

GRONDWATERSTROMING IN KOMGROND EN
DE BEPALING VAN ENIGE HYDROLOGISCHE
GROOTHEDEN IN VERBAND MET HET
ONTWATERINGSSYSTEEM

J. W. VAN HOORN

NN08201,293

GRONDWATERSTROMING IN KOMGROND EN DE BEPALING VAN ENIGE HYDROLOGISCHE GROOTHEDEN IN VERBAND MET HET ONTWATERINGSSYSTEEM

WITH A SUMMARY

GROUND-WATER FLOW IN BASIN CLAY SOIL
AND THE DETERMINATION OF SOME HYDROLOGICAL FACTORS
IN RELATION WITH THE DRAINAGE SYSTEM

PROEFSCHRIFT

TER VERKRUGING VAN DE GRAAD
VAN DOCTOR IN DE LANDBOUWKUNDE
OP GEZAG VAN DE RECTOR MAGNIFICUS, IR. W. F. EHSVOOGEL,
HOOGLERAAR IN DE HYDRAULICA, DE BEVLOEIING,
DE WEG- EN WATERBOUWKUNDE EN DE BOSBOUWARCHITECTUUR,
TE VERDEDIGEN TEGEN DE BEDENKINGEN
VAN EEN COMMISSIE UIT DE SENAAT
DER LANDBOUWHOGESCHOOL TE WAGENINGEN
OP DINSDAG, 13 DECEMBER 1960, TE 16 UUR

DOOR

J. W. VAN HOORN

CENTRUM

VOOR LANDBOUWPUBLIKATIES



EN LANDBOUWDOCUMENTATIE

WAGENINGEN 1960

WOORD VOORAF

Bij het verschijnen van dit proefschrift wil ik gaarne van de gelegenheid gebruik maken om allen te bedanken, die aan het tot stand komen hebben bijgedragen.

Hooggeleerde HELLINGA, hooggeachte promotor, ik ben U zeer erkentelijk voor de kritische opmerkingen en de zorg die U aan de bestudering van dit proefschrift hebt willen wijden.

Hooggeleerde 'T HART, als voorzitter van de Werkgroep Onderzoek Komgronden hebt U mij de vrijheid gelaten het onderzoek naar eigen inzichten te verrichten, waarvoor ik U van harte dank. Ik hoop, dat het resultaat voor U geen teleurstelling betekent.

Weledelgeleerde BRUIN, Zeergeleerde VAN DEN BERG, Weledelgestrenge VISSER, ik dank U voor het feit dat U, in Uw functie van directeur van het Landbouwproefstation en Bodemkundig Instituut T.N.O., van directeur van het Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, van adjunct-directeur van het Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, mij in de gelegenheid hebt gesteld dit onderzoek met een grote mate van vrijheid te verrichten en te voltooien.

Waarde SOL, HAVINGA, RABBINGE en LELIVELD, voor de medewerking die ik van U ondervonden heb bij het verrichten en uitwerken van de waarnemingen, voor Uw adviezen en opmerkingen, dank ik U ten zeerste. Zonder de moeite die U zich hebt gegeven voor dit onderzoek, was dit proefschrift niet tot stand gekomen.

Waarde MINDERHOUD, ik dank je voor de prettige taakverdeling en samenwerking bij het onderzoek in de afgelopen jaren.

U allen, collega's en overige medewerkers van het Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, dank ik voor de adviezen en medewerking die ik op verschillend gebied mocht ondervinden, in het bijzonder jou, SCHIERBEEK, voor de verzorging van de publikatie tijdens mijn afwezigheid.

De redactie van de Verslagen van Landbouwkundige Onderzoekingen ben ik erkentelijk voor de bereidwilligheid deze studie in de Verslagen op te nemen.

STELLINGEN

I

Moldrainage is ongeschikt als ontwateringssysteem op komgrond.

II

De grondwaterstands-debietmethode geeft een betrouwbaarder resultaat voor de *KD*-waarde en de radiale weerstand dan door middel van de boorgatenmethode en profielstudie verkregen wordt.

Dit proefschrift

III

Het ontwateringscriterium is afhankelijk van de bergingscoëfficiënt, het peil in de open watergang, de klimaatsomstandigheden en de eis, die men uit landbouwkundige overwegingen aan het grondwaterstandsverloop stelt.

IV

Voor de vaststelling van het ontwateringscriterium moet het grondwaterstandsverloop berekend worden met de niet-stationaire stromingsvergelijkingen. Wanneer het ontwateringscriterium bepaald is, kunnen vervolgens de stationaire stromingsvergelijkingen toegepast worden voor de berekening van de afstand tussen de open watergangen.

Dit proefschrift

V

Voor de keuze van het ontwateringssysteem is het verschil in gebruiksmogelijkheid van grotere betekenis dan het verschil in opbrengst, dat volgens de grondwaterstands-opbrengstcurve berekend kan worden.

VI

De mening, dat het grasland op komgrond in hoge mate gevoelig is voor droogte en wateroverlast, is onjuist en vindt zijn oorzaak in de extensieve exploitatiewijze en het hoge polderpeil tijdens natte perioden in het verleden.

C. H. EDELMAN e.a.: Een bodemkartering van de Bommelerwaard boven den Meidijk. Versl. Landbouwk. Onderz. 56.18, 1950.

H. EGBERTS: De bodemgesteldheid van de Betuwe. Versl. Landbouwk. Onderz. 56.19, 1950.

VII

Het bezwaar van bouwland op komgrond is niet gelegen in een onvoldoende water- en luchthuishouding, maar in de beperkte gewassenkeuze ten gevolge van de kalifixatie en in de grondbewerking.

D. VAN DIEPEN: De bodemgesteldheid van de Maaskant. Versl. Landbouwk. Onderz. 58.9, 1952.

VIII

Als methode van watervoorziening onder Nederlandse omstandigheden verdient berekening of bevoeiing de voorkeur boven infiltratie, met uitzondering van vlakgelegen grovere zandgronden.

IX

De grotere mate van ijzerafzettingen boven en onder de laklaag kan niet worden toegeschreven aan een stagnerende invloed van de laklaag op de water- en luchthuishouding.

C. H. EDELMAN: Over de bodemgesteldheid van Midden-Nederland. Oosthoek, Utrecht, 1947.

D. VAN DIEPEN: De bodemgesteldheid van de Maaskant. Versl. Landbouwk. Onderz. 58.9, 1952.

X

Aan de externe produktieomstandigheden moet een grotere invloed op de pacht prijs van komgrond worden toegekend dan aan de kwaliteitsklassen.

K.B. van 19 april 1958, Stb. 195.

K.B. van 29 maart 1960, Stb. 114.

XI

Er is geen reden de hoogst toelaatbare pacht prijs voor de kwaliteitsklassen van komgrond op een lager niveau vast te stellen dan voor die van knikgrond.

K.B. van 19 april 1958, Stb. 195.

K.B. van 29 maart 1960, Stb. 114.

XII

Het is niet noodzakelijk wettelijke voorzieningen te treffen om bedrijfssplitsing te voorkomen.

INHOUD

	Blz.
WOORD VOORAF	
I. INLEIDING	1
II. GRONDWATERSTROMING IN KOMGROND	3
1. De stroming in een profiel, bestaande uit lagen van verschillende doorlatendheid	3
a. Het komgrondprofiel	3
b. De verhouding tussen de diepe en ondiepe grondwaterstroming	3
2. De diepe grondwaterstroming	7
a. De stationaire stroming	7
b. De niet-stationaire stroming	14
3. De ondiepe grondwaterstroming	19
4. Samenvatting	20
III. BEPALING VAN ENIGE HYDROLOGISCHE GROOTHEDEN	22
1. De doorlaatfactor en dikte van de goed doorlatende ondergrond en de radiale weerstand	22
a. Bepaling door middel van de grondwaterstands-debietmethode	22
a1. Methode	22
a2. Voorbeelden	30
a3. Samenvatting van de resultaten	36
b. Vergelijking van de resultaten van de grondwaterstands-debietmethode met de boorgatenmethode	36
b1. Drainageproefveld in de Maaskant	38
b2. Drainageproefveld in de Tielerwaard bij Dalem	39
b3. Drainageproefveld in de Tielerwaard bij Hellouw	40
b4. Drainageproefveld in het Hollanderbroek	40
b5. Drainageproefveld in de Tielerwaard bij Asperen	41
b6. Drainageproefveld in de Tielerwaard bij Heukelum	44
b7. Gedraineerde percelen in het Land van Maas en Waal	44
b8. De radiale weerstand	45
b9. Samenvatting	45
2. De doorlaatfactor van de slecht doorlatende laag	46
a. Bepaling door middel van de boorgatenmethode	46
b. Bepaling door middel van ringmonsters	47
c. Bepaling door middel van het potentiaalverschil tussen buizen van verschillende lengte bij grondwaterstroming in de slecht doorlatende laag	48
d. Bepaling door middel van infiltratie met sleuven of infiltrometers in de zodelaag	50

	blz.
e. De invloed van verschillende factoren op de doorlaatfactor van de slecht doorlatende laag	55
f. Het woelen van de slecht doorlatende laag	57
g. Samenvatting	60
3. De doorlaatfactor van de zodelaag	61
a. Bepaling van de doorlaatfactor	61
b. De invloed van verscheidene factoren op de doorlaatfactor van de zodelaag	63
c. Samenvatting	65
4. De bergingscoëfficiënt en de berging van de grond	66
a. Definitie	66
b. Bepaling door middel van de pF -kromme	67
c. Bepaling door middel van de grond-water-luchtverhouding	72
d. Bepaling door middel van de grondwaterstandsverandering	74
e. Samenvatting	78
IV. VERGELIJKING VAN DE WAARNEMINGEN VAN ENIGE AFVOERPERIODEN MET DE WAARDEN, BEREKEND VOLGENS NIET-STATIONAIRE STROMINGSVERGELIJKINGEN	80
1. Het afvoerproces in het geval van drainage	80
a. De berekening van de zakwaterstroming	80
b. De berekening van de diepe afvoersnelheid en het potentiaalverschil in de goed doorlatende ondergrond	86
c. Vergelijking van de waarnemingen met de berekende waarden	92
2. Het afvoerproces in het geval van begreppeling	95
3. Samenvatting	97
V. HET ONTWATERINGSSYSTEEM	99
1. De gemiddelde hydrologische waarden van het komgrondprofiel	99
2. Het grondwaterstandsverloop bij verschillende ontwateringscriteria	101
3. De keuze van het ontwateringssysteem	111
4. Samenvatting	117
SUMMARY	118
BIJLAGEN:	
1. Bepaling van de radiale weerstand	129
2. De coëfficiënten ter berekening van de niet-stationaire stroming	130
LITERATUUR	131
LIJST VAN GEBRUIKTE SYMBOLEN	133
LIST OF USED SYMBOLS	135

Dit proefschrift verschijnt tevens als No. 66. 10 in de reeks Verslagen van Landbouwkundige Onderzoekingen.

I. INLEIDING

Het onderzoek betreffende de waterhuishouding van komgrond, dat sinds 1951 plaats vond onder auspiciën van de Commissie Onderzoek Komgronden, kan verdeeld worden in het onderzoek naar de gewenste grondwaterstand en het onderzoek van de mogelijkheid om een dergelijke grondwaterstand te bereiken. Er kwam een taakverdeling tot stand, waarbij het onderzoek naar de gewenste grondwaterstand door MINDERHOUD (18) geschiedde en het tweede probleem, dat een onderzoek van de grondwaterstroming op komgrond en het toe te passen ontwateringssysteem inhield, aanvankelijk door HOOGHOUTD en later door VAN HOORN werd onderzocht.

In het algemeen kunnen twee systemen voor de ontwatering worden toegepast, namelijk begreppeling en drainage. Op komgrond wordt de begreppeling van ouds toegepast. De mogelijkheid van drainage werd echter betwijfeld in verband met de slechte doorlatendheid van het komgrondprofiel. Door VISSER (28) werd daarentegen erop gewezen, dat in het komgrondprofiel ook steeds een goed doorlatende laag onder de slecht doorlatende laag voorkomt en dat hierin een mogelijkheid voor de drainage gelegen is. Door HOOGHOUTD (14) werd bij een onderzoek op het proefbedrijf „De Heiligerhoef” in de Maaskant de doorlaatfactor van de goed doorlatende laag bepaald en op grond hiervan geconcludeerd dat een drainage met zeer grote afstanden van 35 à 45 m mogelijk is, mits de drainreeksen in de goed doorlatende laag gelegen zijn.

Het onderzoek werd begonnen met een inventarisatie van gedraineerde percelen, waaruit echter bleek, dat de drainreeksen in het algemeen ondiep en slecht waren aangelegd en onvoldoende onderhouden, terwijl ook de sloten en eventuele onderbemalingen zodanige gebreken vertoonden dat een goede werking van het drainagesysteem niet mogelijk was. Daar de praktijk op dit gebied derhalve onvoldoende mogelijkheden tot onderzoek bood, werden enige drainageproefvelden, voorzien van een onderbemaling, aangelegd. De ontwikkeling in de ruilverkavelingen Land van Maas en Waal-West, en Bommelerwaard-Oost, die leidde tot drainage van de verplaatste bedrijven op komgrond, bood de mogelijkheid om hier zowel proefvelden aan te leggen alsook de theorie op ruime schaal in praktijk te brengen. In figuur 1 is de ligging van de verschillende objecten, waar het onderzoek verricht werd, weergegeven.

Door de aanwezigheid van de drainageproefvelden en in ruilverkavelingsverband gedraineerde kavels, was het mogelijk op een aantal plaatsen de hydrologische gesteldheid van het komgrondprofiel en het proces van de grondwaterstroming te onderzoeken. Als gevolg van de doelstelling, had het onderzoek een sterk toegepast karakter, waarbij gebruik kon worden gemaakt van de formules voor de grondwaterstroming en van de verschillende bepalingsmethoden voor de hydrologische grootheden die in de laatste decennia ter beschikking zijn gekomen. Met deze formules en de gemeten hydrologische grootheden werd nagegaan hoe het ontwateringsadvies, bij een gecompliceerd bodemprofiel in een vlak polderland, kan worden opgesteld. Hoe-

FIG. 1. Ligging van de proefvelden en de gedraineerde kavels. Drainageproefvelden in de Tielerwaard: Dalem (1); Heukelum (2); Asperen (3); Hellouw (4). Drainageproefveld Hollanderbroek (5) en Maaskant (6). Gedraineerde kavels in Land van Maas en Waal (7). Woelproefveld (8). Grondwaterstandsproefveld „De Vlierd” (9). Proefbedrijf „De Hardepoel” (10)

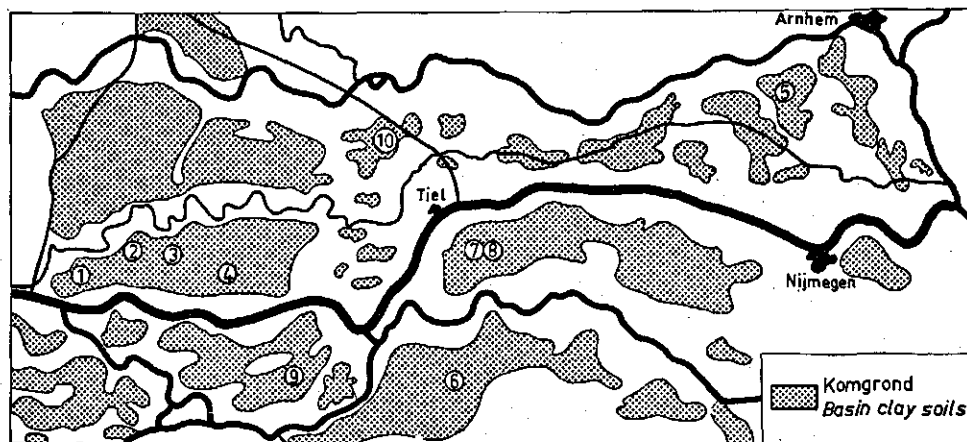


FIG. 1. Situation of the drainage experimental fields and the tile-drained parcels. Drainage experimental fields in the 'Tielerwaard': Dalem (1); Heukelum (2); Asperen (3); Hellouw (4). Drainage experimental field 'Hollanderbroek' (5) and 'Maaskant' (6). Tile-drained parcels in the 'Land van Maas en Waal' (7). Experimental field on subsoiling (8). Ground-water level experimental field 'De Vlierd' (9). Experimental farm 'De Hardepoel' (10)

wel de gemeten hydrologische waarden alleen op het komgrondprofiel betrekking hebben, is de beschouwing over de grondwaterstroming en het ontwateringssysteem in het algemeen van toepassing op gronden, die eenzelfde hydrologische opbouw vertonen, met een hooggelegen slecht doorlatende laag in het profiel, als de komgrond.

II. GRONDWATERSTROMING IN KOMGROND

1. DE STROMING IN EEN PROFIEL, BESTAANDE UIT LAGEN VAN VERSCHILLENDE DOORLATENDHEID

a. *Het komgrondprofiel*

Komgronden zijn zware, meestal kalkarme, rivierkleigronden met een slibgehalte van meer dan 60 %, die ontstaan zijn door de bezinking van slibrijk materiaal in de laag gelegen kommen van het rivierlandschap. Indien op een geringere diepte dan 1,20 m lichtere lagen of veen in de ondergrond voorkomen, wordt deze grond in de legenda van de bodemkartering aangegeven als komgrond-op-stroomruggrond of komgrond-op-veen. Daar de mechanische samenstelling van de ondergrond niet van overwegend belang is voor de grondwaterstroming, zullen in deze publikatie de drie bodemreeksen onder de naam komgrond worden samengevat. Wat de doorlatendheid betreft, kan men in een komgrondprofiel in principe drie lagen onderscheiden. Hier-tussen komen overgangszones voor, die voor het algemene stromingsbeeld echter buiten beschouwing gelaten kunnen worden.

De eerste laag is de zodelaag of bouwvoor, die tengevolge van het hoge humusgehalte en de sterke doorworteling of door de grondbewerking goed doorlatend is. In het algemeen neemt de doorlaatfactor van de zodelaag af van ongeveer 1 m/dag in de bovenste 5 cm tot ongeveer 0,2 m/dag in de laag 0,10 tot 0,20 m -mv.

De tweede laag bestaat uit slecht doorlatende zware klei, waarvan de kleur varieert tussen bruin, grijs en blauw, en die meer of minder roestig is door het voorkomen van ijzer en waarin soms een roestarme zone voorkomt, die op de breukvlakken een lakachtige indruk maakt, de zogenaamde laklaag. De slecht doorlatende laag, waarvan de doorlaatfactor doorgaans enige cm/dag bedraagt, begint op ca. 0,20 m -mv en eindigt op 0,60 tot 1,00 m -mv.

De derde laag is weer goed doorlatend en kan bestaan uit zware, brokkelige klei met ijzerconcreties óf uit lichtere lagen óf uit weinig tot sterk gescheurde humeuze of venige klei tot veen óf uit een opeenvolging van deze verschillende lagen. De goed doorlatende ondergrond, waarvan de doorlaatfactor van plek tot plek grote verschillen vertoont, maar in het algemeen een orde van grootte van enige m/dag heeft, kan op grotere diepte weer begrensd worden door een slecht doorlatende laag.

Het komgrondprofiel wordt dus gekenmerkt door het voorkomen van lagen met een groot verschil in doorlatendheid: een goed doorlatende bovenlaag, een slecht doorlatende tussenlaag en een goed doorlatende ondergrond tot een zekere diepte.

b. *De verhouding tussen diepe en ondiepe grondwaterstroming*

Volgens HOOGHOUT (13) en ERNST (2) kan de grondwaterstroming geschematiseerd worden tot een verticale stroming in een slecht doorlatende laag, een horizontale stroming in een goed doorlatende laag en een radiale stroming in de nabijheid van de open watergang. Eerst indien de *KD*-waarde van een slecht doorlatende laag groter

wordt dan 0,1 van de *KD*-waarde van een goed doorlatende laag, zullen volgens ERNST (2) merkbare fouten bij deze schematisering kunnen optreden.

Bij de afvoer van neerslag kunnen zich in een profiel, dat bestaat uit lagen van verschillende doorlatendheid zoals het komgrondprofiel, enige, hieronder te bespreken, mogelijkheden voordoen. Uitgegaan zal worden van de veronderstelling, dat geen vochttekort in de grond moet worden aangevuld en geen verdamping optreedt, zodat de neerslag volledig wordt afgevoerd. Onder de indringingssnelheid in de slecht doorlatende laag zal worden verstaan de snelheid, waarmee de neerslag in de slecht doorlatende laag kan dringen en wel in onverzadigde grond volgens de vergelijkingen 2.1 of 2.2 en in verzadigde grond volgens vergelijking 2.6.

Wanneer de neerslagintensiteit niet groter wordt dan de indringingssnelheid in de slecht doorlatende laag, zakt de neerslag verticaal naar beneden en voegt zich bij de grondwaterzone. Indien de grondwaterstand in de goed doorlatende ondergrond gelegen is, zoals in figuur 2a het geval is, dan vindt de grondwaterstroming volgens het bovengenoemde schema dus overwegend in horizontale- en nabij de open watergang in radiale richting plaats. In de goed doorlatende laag, waarin de stroombanen als horizontaal beschouwd kunnen worden, kan het potentiaalverschil in verticale richting verwaarloosd worden. Derhalve zal in buizen met verschillende filterdiepte in de goed doorlatende ondergrond dezelfde potentiaal gemeten worden. Wanneer de potentiaal, gemeten in de goed doorlatende ondergrond, beneden de slecht doorlatende laag ligt, is deze gelijk aan de grondwaterstand.

Onder de potentiaal in een punt van een stromingsveld wordt verstaan de som van de in dat punt bestaande drukhoogte, gemeten als de lengte van een waterkolom, en de hoogte van het betreffende punt ten opzichte van een horizontaal vergelijkingsvlak, d.w.z. de som van de drukpotentiaal en de plaatspotentiaal, uitgedrukt in een lengtemaat. De grondwaterstand of het freatisch niveau is het vlak, waar de atmosferische druk heerst en dat als nulvlak voor de drukpotentiaal wordt aangenomen.

Indien de grondwaterstand, zoals in figuur 2b, in de slecht doorlatende laag gelegen is, vindt de grondwaterstroming eerst in verticale richting door de slecht doorlatende laag plaats en vervolgens op dezelfde wijze als in het geval van figuur 2a. Voor de verticale stroming door de slecht doorlatende laag is een zeker potentiaalverschil nodig, dat in principe gemeten kan worden als het verschil tussen de waterstand in twee buizen, waarvan de filters zich respectievelijk bevinden in de slecht doorlatende laag ter plaatse van de grondwaterstand en in de goed doorlatende ondergrond. De eerstgenoemde buis geeft in dit geval de grondwaterstand aan, de tweede buis de potentiaal in de goed doorlatende ondergrond.

Wanneer de neerslagintensiteit echter groter wordt dan de indringingssnelheid in de slecht doorlatende laag, stagneert de neerslag ten dele boven deze laag. Er ontstaat een tweede grondwaterzone in de goed doorlatende bovenlaag, waarin eveneens stroming in horizontale richting naar de open watergang plaats vindt. In de figuren 2c en 2d is deze situatie weergegeven, waarbij twee grondwaterzones voorkomen. Stijgt de diepe grondwaterstand tot de bovenlaag, dan ontstaat één grondwaterzone, fig. 2e.

Bij de afvoer van de neerslag in een komgrondprofiel kan derhalve onderscheid gemaakt worden tussen de diepe afvoer door de slecht doorlatende laag en de goed doorlatende ondergrond, en de ondiepe afvoer door de goed doorlatende bovenlaag.

- FIG. 2. De afvoer van neerslag in een komgrondprofiel. 1 = goed doorlatende bovenlaag; 2 = slecht doorlatende laag; 3 = goed doorlatende ondergrond
- FIG. 2a. De neerslagintensiteit is kleiner of gelijk aan de indringingssnelheid in de slecht doorlatende laag. De grondwaterstand ligt in laag 3 en is gelijk aan de potentiaal in de goed doorlatende ondergrond
- FIG. 2b. De neerslagintensiteit is kleiner of gelijk aan de indringingssnelheid in de slecht doorlatende laag. De grondwaterstand ligt in laag 2 en verschilt een bedrag Δh_2 met de potentiaal in de goed doorlatende ondergrond
- FIG. 2c. De neerslagintensiteit is groter dan de indringingssnelheid in de slecht doorlatende laag. De diepe grondwaterstand ligt in laag 3, de ondiepe grondwaterstand in laag 1
- FIG. 2d. De neerslagintensiteit is groter dan de indringingssnelheid in de slecht doorlatende laag. De diepe grondwaterstand ligt in laag 2, de ondiepe grondwaterstand in laag 1
- FIG. 2e. De neerslagintensiteit is groter dan de indringingssnelheid in de slecht doorlatende laag. Er komt één grondwaterzone voor

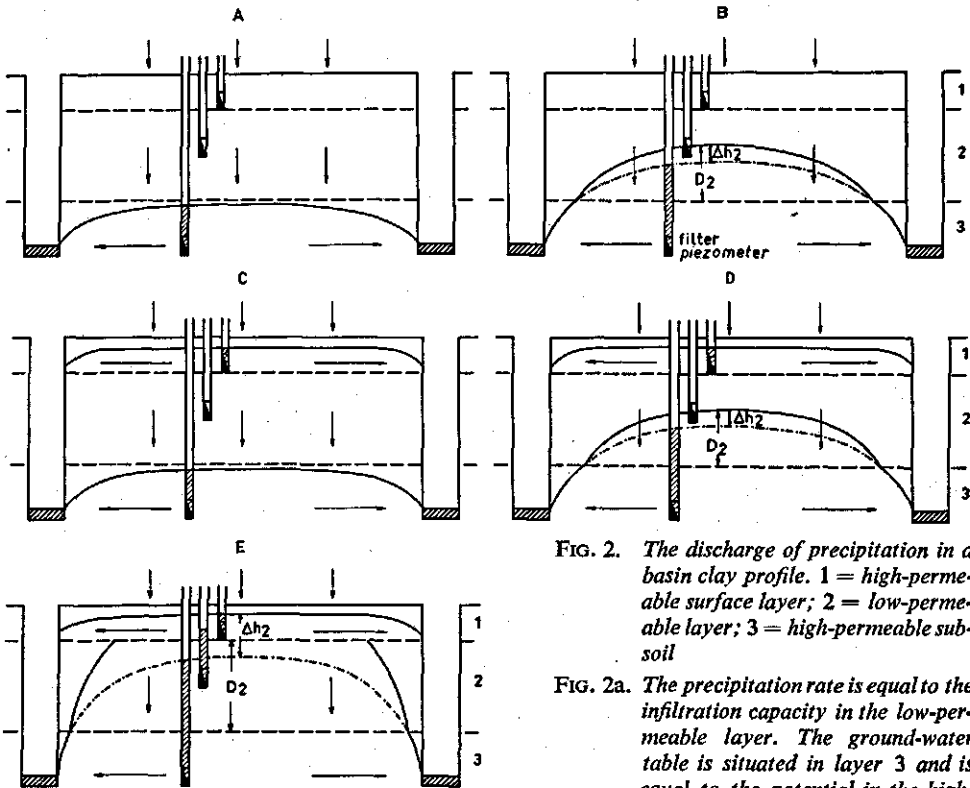


FIG. 2. The discharge of precipitation in a basin clay profile. 1 = high-permeable surface layer; 2 = low-permeable layer; 3 = high-permeable subsoil

FIG. 2a. The precipitation rate is equal to the infiltration capacity in the low-permeable layer. The ground-water table is situated in layer 3 and is equal to the potential in the high-permeable subsoil

FIG. 2b. The precipitation rate is equal to the infiltration capacity in the low-permeable layer. The ground-water table is situated in layer 2 and differs an amount Δh_2 from the potential in the high-permeable subsoil

FIG. 2c. The precipitation rate exceeds the infiltration capacity in the low-permeable layer. The deep ground-water table is situated in layer 3, the shallow ground-water table in layer 1

FIG. 2d. The precipitation rate exceeds the infiltration capacity in the low-permeable layer. The deep ground-water table is situated in layer 2, the shallow ground-water table in layer 1

FIG. 2e. The precipitation rate exceeds the infiltration capacity in the low-permeable layer. Only one ground-water zone is present

Door HOOCHOUT (12) wordt gesproken van het 'doordengrondse' en het 'bovengrondse' ontwateringstype en door FLODKVIST (7) van 'tijdelijk' en 'blijvend' grondwater. Hier wordt de voorkeur gegeven aan de adjectiva diep en ondiep in samenhang met grondwaterstand, grondwaterstroming en afvoer.

Oppervlakte-afvoer over het maaiveld moet op een komgrondprofiel niet als een normale vorm van afvoer worden beschouwd. Indien echter, door een of andere vorm van structuurbederf, de doorlaatfactor van de zodelaag of bouwvoor sterk verlaagd is, vindt indringing van neerslag in de grond slechts langzaam plaats. Hierdoor zal een gedeelte van de neerslag op het maaiveld stagneren en aanleiding geven tot oppervlakte-afvoer en plasvorming.

Het voorkomen van de ondiepe afvoer wordt bepaald door de verhouding tussen de regenintensiteit en de indringingssnelheid in de slecht doorlatende laag. Wat de tweede factor betreft, moet een onderscheid worden gemaakt tussen onverzadigde en verzadigde grond, waaronder respectievelijk de zone boven en de zone beneden de grondwaterstand wordt verstaan.

Het binnendringen van water in onverzadigde grond vindt volgens VAN DUIN (1) plaats onder invloed van de zwaartekracht, de onderdruk aan het bevochtigingsfront en de waterhoogte boven het indringingsvlak, zodat volgens de stromingsvergelijking van Darcy de volgende betrekking kan worden afgeleid:

$$a'_2 = K_T \frac{\psi + z + h}{z} \quad (2.1)$$

Hierin is a'_2 de indringingssnelheid in de onverzadigde zone van de tweede, de slecht doorlatende, laag; K_T de doorlaatfactor van de transmissiezone, waardoor het transport van het water plaats heeft vanaf het oppervlak naar de bevochtigingszone; ψ de onderdruk aan het bevochtigingsfront; z de afstand van dit front tot het indringingsvlak en h de waterhoogte boven het indringingsvlak.

Naarmate de diepte van het bevochtigingsfront toeneemt en de grond vochtiger wordt, worden ψ en h kleiner ten opzichte van z . Wanneer het bevochtigingsfront de grondwaterstand heeft bereikt en er geen water boven het indringingsvlak staat, wordt in een homogeen profiel het verhang gelijk aan 1. Zolang in een komgrondprofiel de grondwaterstand beneden de slecht doorlatende laag blijft, bestaat er een onderdruk aan de onderkant van de slecht doorlatende laag en is het verhang in de slecht doorlatende laag groter dan 1. Stijgt de grondwaterstand in de slecht doorlatende laag, dan wordt het verhang gelijk aan 1. Daar de doorlaatfactor in de transmissiezone op kleigrond vrijwel gelijk is aan de doorlaatfactor in verzadigde grond [VAN DUIN (1)], wordt de indringingssnelheid dan bij benadering gelijk aan de doorlaatfactor K_2 van de slecht doorlatende laag:

$$a'_2 = K_T \sim K_2 \quad (2.2)$$

Wanneer de grondwaterstand echter gestegen is tot de bovenkant van de slecht doorlatende laag en de indringing plaats vindt in verzadigde grond, kan de indringingssnelheid niet groter zijn dan de afvoersnelheid van het ontwateringssysteem en geldt hiervoor vergelijking 2.6 (paragraaf 2a).

Het proces kan met het volgende voorbeeld toegelicht worden, waarbij verondersteld wordt, dat de doorlaatfactor van de slecht doorlatende laag 0,05 m/dag d.i. 2 mm/uur bedraagt en luchtingsluiting geen storende factor vormt.

Zolang de grondwaterstand zich tussen de boven- en onderkant van de slecht doorlatende laag bevindt en de regenintensiteit een waarde van 2 mm/uur niet overschrijdt, kan de afvoer geheel door de slecht doorlatende laag en de goed doorlatende ondergrond plaats vinden. Wordt de regenintensiteit groter dan 2 mm/uur, dan treedt tevens ondiepe afvoer op.

Stijgt echter de grondwaterstand tot de bovenkant van de slecht doorlatende laag en bedraagt de afvoersnelheid van het ontwateringssysteem bij deze grondwaterstand 7 mm/dag d.i. 0,3 mm/uur, dan zal reeds bij een regenintensiteit die groter is dan 0,3 mm/uur, ondiepe afvoer optreden.

Naarmate de diepe grondwaterstand en de daarmee samenhangende potentiaal van de goed doorlatende ondergrond bij het begin van de regenperiode lager zijn en langzamer stijgen, dringt gedurende langere tijd de neerslag in onverzadigde grond en vindt de afvoer in sterkere mate door de slecht doorlatende laag en de goed doorlatende ondergrond plaats. Voor de verhouding tussen de diepe en de ondiepe afvoer is derhalve naast de regenintensiteit, en de doorlaatfactor en de dikte van de slecht doorlatende laag, ook de potentiaal van de goed doorlatende ondergrond van belang en daarmee die factoren waarvan deze potentiaal afhankelijk is.

2. DE DIEPE GRONDWATERSTROMING

a. De stationaire stroming

Wanneer in een neerslagperiode de grondwaterstand stijgt en de afvoer toeneemt, zal na zekere tijd bij aanhoudende en regelmatig verdeelde regenval een evenwicht optreden tussen de aanvoer door de neerslag en de afvoer naar de open watergang, waarbij de grondwaterstand gelijk blijft. In dit geval is de grondwaterstroming stationair.

Voor de stationaire toestand werd door HOOGHOUT (13) de volgende formule afgeleid:

$$a = \frac{8 K d \Delta h}{l^2} + \frac{4 K \Delta h^2}{l^2} \quad (2.3)$$

Hierin is a de afvoersnelheid in m/dag, K de doorlaatfactor in m/dag, l de afstand tussen de open watergangen in m, Δh de hoogte van de grondwaterstand midden tussen de open watergangen boven het peil in de open watergang in m en d de dikte van de zogenaamde equivalentelaag in m. Bij de afleiding van vergelijking 2.3 en in het bijzonder van d werd door HOOGHOUT uitgegaan van de veronderstelling, dat de grondwaterstroming op enige afstand van de open watergang horizontaal verloopt en rondom de open watergang radiaal. Het potentiaalverschil voor de radiale stroming wordt nu in rekening gebracht door niet de werkelijke dikte van de doorstroomde laag toe te passen, maar de dikte van een equivalentelaag, die afhankelijk is van de natte omtrek van de open watergang, de afstand tussen de open watergangen en de diepte, waarop een ondoorlatende laag voorkomt (13).

De eerste en tweede term van vergelijking 2.3 hebben betrekking op de horizontale stroming in de lagen respectievelijk onder en boven het peil van de open watergang.

In een komgrondprofiel kan de horizontale stroming door de slecht doorlatende laag worden verwaarloosd. Is ook de horizontale stroming door de goed doorlatende ondergrond boven het peil van de open watergang klein ten opzichte van de stroming beneden het peil van de open watergang, dan is de tweede term te verwaarlozen en gaat vergelijking 2.3 voor een komgrondprofiel over in:

$$a_3 = \frac{8 K_3 d \Delta h_3}{l^2} \quad (2.4)$$

Hierin is a_3 de diepe afvoersnelheid, K_3 de doorlaatfactor van de goed doorlatende ondergrond en Δh_3 het verschil tussen de potentiaal in de goed doorlatende ondergrond midden tussen de open watergangen en het peil in de open watergang. Dit verschil wordt in het vervolg het potentiaalverschil in de goed doorlatende ondergrond genoemd.

De toepassing van vergelijking 2.4 wordt op een komgrondprofiel in zoverre beperkt, dat de bodem van de open watergang in de goed doorlatende ondergrond gelegen moet zijn. Is de bodem van de watergang echter in de slecht doorlatende laag gelegen, dan geeft de formule van HOOGHOUTD geen mogelijkheid om dit type radiale stroming tot uitdrukking te brengen en kan het potentiaalverschil voor de radiale stroming niet in de equivalentlaag in rekening worden gebracht.

Deze beperking geldt niet voor een door ERNST (2) afgeleide formule, waarbij het totale potentiaalverschil voor de grondwaterstroming gesplitst wordt in potentiaalverschillen respectievelijk voor de verticale stroming, voor de horizontale stroming en voor de radiale stroming, waarin w de radiale weerstand is:

$$\Delta h = \Delta h_{vert} + \Delta h_{hor} + \Delta h_{rad} = a \Sigma \frac{D}{K} + \frac{al^2}{8 \Sigma K D} + alw \quad (2.5)$$

Vergelijking 2.5 geldt voor de voorwaarde $l > 2 \Sigma D$, waaraan bij de ontwatering van komgrond wordt voldaan, daar de dikte van de lagen waarin de grondwaterstroming plaatsvindt, doorgaans niet meer dan 2 à 3 m bedraagt.

Het verticale potentiaalverschil in de goed doorlatende ondergrond kan verwaarloosd worden. Derhalve is het verticale potentiaalverschil gelijk aan het potentiaalverschil in de slecht doorlatende laag en dit moet in rekening worden gebracht wanneer de grondwaterstand in deze laag ligt. Daar beneden de grondwaterstand de afvoersnelheid in de slecht doorlatende laag gelijk is aan de diepe afvoersnelheid, geldt:

$$\Delta h_{vert} = \Delta h_2 = a_3 \frac{D_2}{K_2} \quad (2.6)$$

Is de bodem van de open watergang in de goed doorlatende ondergrond gelegen, dan is D_2 de afstand van de grondwaterstand tot de onderkant van de slecht doorlatende laag (figuur 2b, d) en maximaal de dikte van de slecht doorlatende laag (figuur 2e). Is de bodem van de open watergang in de slecht doorlatende laag gelegen, dan verdient het volgens ERNST (2) aanbeveling om voor D_2 de afstand van de grondwaterstand tot de bodem van de open watergang te nemen.

Daar de horizontale stroming door de slecht doorlatende laag te verwaarlozen is, wordt de som van het horizontale en radiale potentiaalverschil gelijk aan het po-

tentiaalverschil in de goed doorlatende ondergrond. Is, evenals bij de afleiding van 2.4, de horizontale stroming in de goed doorlatende ondergrond boven het peil van de open watergang te verwaarlozen, dan geldt:

$$\Delta h_{hor} + \Delta h_{rad} = \Delta h_3 = \frac{a_3 l^2}{8 K_3 D'_3} + a_3 l w \quad (2.7)$$

In tegenstelling met de equivalentlaag d is D'_3 de werkelijke dikte van de goed doorlatende ondergrond beneden het peil van de open watergang.

Is de grondwaterstand in de goed doorlatende ondergrond gelegen (figuur 3a), dan geldt de vergelijking 2.7 ook voor het totale potentiaalverschil. Is de grondwaterstand echter in de slecht doorlatende laag gelegen (figuur 3b), dan geldt voor het totale potentiaalverschil:

$$\Delta h = \Delta h_2 + \Delta h_3 = a_3 \frac{D_2}{K_2} + \frac{a_3 l^2}{8 K_3 D'_3} + a_3 l w \quad (2.8)$$

Voor een open watergang met halfcirkelvormige natte omtrek $\pi r = u$ in een homogeen profiel met doorlaatfactor K en dikte D is de radiale weerstand volgens ERNST (2):

$$w = \frac{1}{\pi K} \ln \frac{D}{u} \quad (2.9)$$

Is de open watergang gelegen in een slechtdoorlatende laag met doorlaatfactor K_3 , die op een diepte

FIG. 3. Vergelijkingen voor het totale potentiaal verschil. 1 = goed doorlatende bovenlaag; 2 = slecht doorlatende laag; 3 = goed doorlatende laag; 4 = ondoorlatende laag

FIG. 3a. De grondwaterstand ligt in de goed doorlatende laag. Bij verwaarlozing van de horizontale stroming boven het peil van de open watergang geldt vergelijking 2.7 voor het totale potentiaal verschil

FIG. 3b. De grondwaterstand ligt in de slecht doorlatende laag. Bij verwaarlozing van de horizontale stroming boven het peil van de open watergang geldt vergelijking 2.8 voor het totale potentiaal verschil

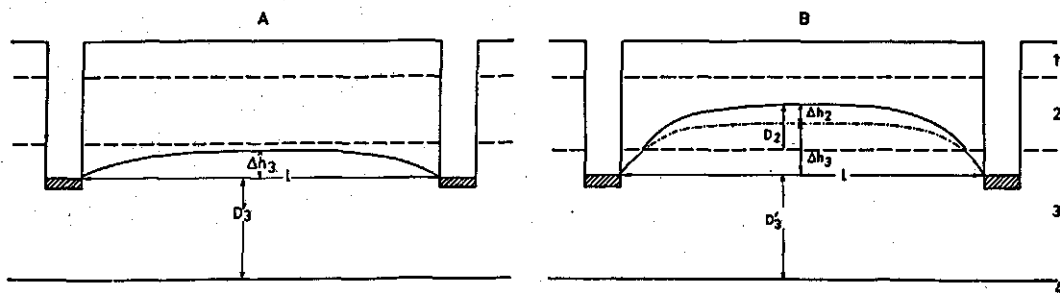


FIG. 3. Equations for the total potential difference. 1 = high-permeable surface layer; 2 = low-permeable layer; 3 = high-permeable layer; 4 = impermeable layer

FIG. 3a. The ground-water table is situated in the high-permeable layer. Neglecting the horizontal flow above the water level of the ditch or tile line, equation 2.7 is valid for the total potential difference

FIG. 3b. The ground-water table is situated in the low-permeable layer. Neglecting the horizontal flow above the water level of the ditch or tile line, equation 2.8 is valid for the total potential difference

D_2 onder het peil van de open watergang gevolgd wordt door een goed doorlatende laag met doorlaatfactor K_2 en dikte D_2 , dan is de radiale weerstand:

$$w = w_0 + \frac{\ln 0,8 D_2/u}{\pi K_2} \quad (2.10)$$

Hierin is w_0 afhankelijk van de verhouding tussen K_3 en K_2 en tussen D_3 en D_2 en kan grafisch worden bepaald (2), waarvoor naar bijlage 1 verwezen wordt.

Bij de bepaling van de radiale weerstand moet er rekening mee gehouden worden, dat de natte omtrek tenminste gelijk is aan $a/l/K$, aldus ERNST. Is de natte omtrek beneden het peil van de open watergang kleiner dan $a/l/K$, dan ontstaat door het uitstreden van water boven het peil van de open watergang een zogenaamd kweloppervlak, waardoor de natte omtrek wordt vergroot. Hierdoor neemt de radiale weerstand w af, doch het radiale potentiaalverschil wordt vergroot met de hoogte van het kweloppervlak en bedraagt dan:

$$\Delta h_{rad} = alw + \frac{a/l/K - u}{2} \quad (2.11)$$

Met het volgende voorbeeld zal worden toegelicht, in welke mate de diepte van het ontwateringssstelsel op een komgrondprofiel van invloed is op het verticale, horizontale en radiale potentiaalverschil en op de afstand tussen de open watergangen bij een bepaalde ontwateringseis voor de diepe afvoersnelheid en grondwaterstand.

Hierbij wordt uitgegaan van het komgrondprofiel, dat in figuur 4 is weergegeven. De slecht doorlatende laag met een doorlaatfactor van 0,05 m/dag strekt zich uit van 0,20 tot 0,70 m -mv. In de goed doorlatende ondergrond, die op een diepte van 2,00 m -mv weer door een slecht doorlatende laag wordt begrensd, kunnen twee zones onderscheiden worden. De eerste zone met een doorlaatfactor van 0,3 m/dag loopt van 0,70 tot 1,00 m -mv, de tweede zone met een doorlaatfactor van 1,0 m/dag van 1,00 tot 2,00 m -mv. Een dergelijke overgangszone met een doorlaatfactor van enige dm/dag is een veel voorkomend verschijnsel.

De ontwatering vindt plaats door middel van drainreeksen, waarin het peil 5 cm boven de bodem van de sleuf ligt en die respectievelijk op een diepte van 0,60; 0,70; 0,80; 0,90 en 1,00 m -mv gelegen zijn. De berekening wordt zowel uitgevoerd voor de ontwateringseis, dat de diepe afvoersnelheid 7 mm/dag bij een totaal potentiaalverschil van 25 cm bedraagt, als voor de eis, dat de diepe afvoersnelheid 7 mm/dag bedraagt bij een grondwaterstand van 0,30 m -mv.

De berekening kan als volgt worden toegelicht: Bij een draindiepte van 80 cm is de drain in de overgangszone van de goed doorlatende laag gelegen. Is de sleuf 25 cm breed, dan bedraagt de natte omtrek beneden de waterspiegel $u = 0,25 + 2 \times 0,05 = 0,35$ m. Voor de radiale weerstand kan volgens vergelijking 2.10 berekend worden:

$$w = \frac{0,55}{0,3} + \frac{1}{3,14 \times 0,3} \ln 0,8 \times 0,25/0,35 = 1,2 \text{ dag/m}$$

Het totale potentiaalverschil bedraagt 0,45 m bij een afvoer van 0,007 m/dag, zodat de drainafstand berekend kan worden volgens vergelijking 2.8:

$$0,45 = 0,007 \times \frac{0,40}{0,05} + \frac{0,007 l^2}{8 (1,0 + 0,06)} + 0,007 \times 1,2 l$$

$l = 17 \text{ m}$

Bij een afstand van 17 m moet de natte omtrek $0,007 \times 17/0,3 = 0,39$ m bedragen. De hoogte van

het kweloppervlak bedraagt derhalve 0,02 m. Bij een natte omtrek van 0,39 m wordt voor de radiale weerstand 1,1 dag/m berekend. De drainafstand kan nu voor de tweede maal berekend worden:

$$0,45 = 0,007 \times \frac{0,40}{0,05} + \frac{0,007 l^2}{8 (1,0 + 0,06)} + 0,007 \times 1,1 l + 0,02$$

$$l = 17 \text{ m}$$

De vergroting van Δh_{rad} door het kweloppervlak is gecompenseerd door de verlaging van de radiale weerstand, zodat de drainafstand gelijk blijft. De verticale, horizontale en radiale potentiaalverschillen bedragen respectievelijk 5, 25 en 15 cm.

Bij een draindiepte van 100 cm is de drain in de tweede zone van de goed doorlatende laag gelegen. Voor de radiale weerstand kan volgens vergelijking 2.9 berekend worden:

$$w = \frac{1}{3,14 \times 1,0} \ln \frac{1,00}{0,35} = 0,3 \text{ dag/m}$$

Bij een potentiaalverschil van 0,65 m en een afvoer van 0,007 m/dag bedraagt de drainafstand:

$$0,65 = 0,007 \times \frac{0,40}{0,05} + \frac{0,007 l^2}{8 \times 1,0} + 0,007 \times 0,3 l$$

$$l = 25 \text{ m}$$

De verticale, horizontale en radiale potentiaalverschillen bedragen respectievelijk 5, 54 en 6 cm.

In dit geval kan de drainafstand ook volgens vergelijking 2.4 worden berekend, waarbij de aequivalentlaag wordt toegepast. Brengt men op het totale potentiaalverschil 5 cm voor het verticale potentiaalverschil in mindering, dan geldt:

$$l^2 = \frac{8 \times 1,0 \times 0,91 \times 0,60}{0,007} = 624$$

$$l = 25 \text{ m}$$

Tussen de uitkomsten volgens de formules van HOOGHOUT en ERNST bestaat in dit geval geen verschil. Door HOOGHOUT (13) werd voor het radiale potentiaalverschil in het geval van een homogeen stromingsveld met een diep gelegen ondoorlatende laag afgeleid:

$$\Delta h_{rad} = \frac{al}{\pi K} \left(\ln \frac{l}{2 r_0} - 0,454 \right)$$

Deze vergelijking is identiek met vergelijking 2.9, indien $u = \pi r_0$.

TABEL 1a. Verband tussen de draindiepte en de verticale, horizontale en radiale potentiaalverschillen en de drainafstand bij een diepe afvoersnelheid van 7 mm/dag en een totaal potentiaalverschil van 25 cm

Draindiepte in m -mv	Δh in cm	Δh_{vert} in cm	Δh_{hor} in cm	Δh_{rad} in cm	Drainafstand in m
0,60	25	4	1	19	4
0,70	25	4	10	11	11
0,80	25	3	12	10	12
0,90	25	1	16	8	14
1,00	25	0	22	3	16
Depth of drainage in m. below surface	Δh in cm.	Δh_{vert} in cm.	Δh_{hor} in cm.	Δh_{rad} in cm.	Drain spacing in m.

TABLE 1a. Relation of the depth of drainage with the vertical, horizontal and radial potential difference and with the drain spacing, at a rate of deep discharge of 7 mm/day and a total potential difference of 25 cm.

TABEL 1b. Idem, bij een diepe afvoersnelheid van 7 mm/dag en een grondwaterstand van 0,30 m -mv

Draindiepte in m -mv	Δh in cm	Δh_{vert} in cm	Δh_{hor} in cm	Δh_{rad} in cm	Drainafstand in m
0,60	25	4	1	19	4
0,70	35	5	16	14	14
0,80	45	5	25	15	17
0,90	55	5	37	13	21
1,00	65	5	54	6	25

Depth of drainage in m. below surface	Δh in cm.	Δh_{vert} in cm.	Δh_{hor} in cm.	Δh_{rad} in cm.	Drain spacing in m.
--	----------------------	-----------------------------	----------------------------	----------------------------	---------------------

TABLE 1b. The same, at a rate of deep discharge of 7 mm/day and a ground-water level at 0.30 m. below surface

FIG. 4. Verband tussen de draindiepte, in m -mv in een komgrondprofiel en de verticale, horizontale en radiale potentiaalverschillen (Δh_{vert} , Δh_{hor} , Δh_{rad}), uitgedrukt in % van het totale potentiaalverschil

FIG. 4a. Bij een diepe afvoersnelheid van 7 mm/dag en een totaal potentiaal verschil van 25 cm

FIG. 4b. Bij een afvoersnelheid van 7 mm/dag en een grondwaterstand van 0,30 m -mv

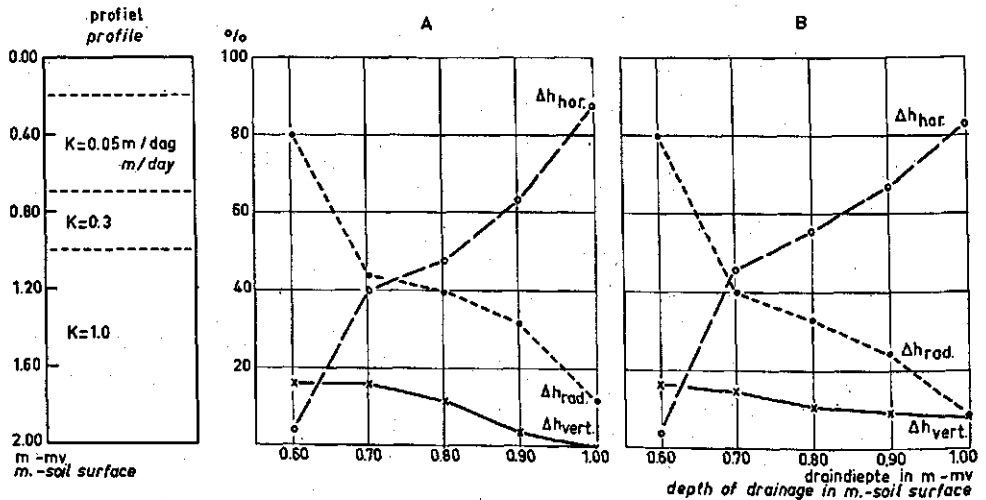


FIG. 4. Relation of the depth of drainage in m. below surface with the vertical, horizontal and radial potential difference (Δh_{vert} , Δh_{hor} , Δh_{rad}) expressed in % of the total potential difference

FIG. 4a. At a rate of deep discharge of 7 mm/day and a total potential difference of 25 cm.

FIG. 4b. At a rate of deep discharge of 7 mm/day and a ground-water level at 0.30 m. below surface

In tabel 1a en 1b en figuur 4a en b, zijn de resultaten van de berekening weergegeven. Bij een afvoersnelheid van 7 mm/dag en een totaal potentiaalverschil van 25 cm neemt het verticale potentiaalverschil in absolute en relatieve waarde af bij grotere draindiepte. Dit geldt ook voor het radiale potentiaalverschil, in het bijzonder wanneer de doorlaatfactor van de laag waarin de drain gelegen is, groter wordt. Dit leidt tot een

toename van het horizontale potentiaalverschil en van de drainafstand. Bij een afvoersnelheid van 7 mm/dag en een grondwaterstand van 0,30 m -mv neemt tevens het totale potentiaalverschil toe bij grotere draindiepte, wat voor het grootste gedeelte ter beschikking komt aan het horizontale potentiaalverschil. Hierdoor neemt de drainafstand nogmaals toe.

In een komgrondprofiel heeft een verlaging van het drainniveau, zolang de drain niet gelegen is in de zone met de grootste doorlaatfactor, een groter effect op de afstand dan in homogene profielen, daar zowel het totale potentiaalverschil als het relatieve aandeel van het horizontale potentiaalverschil toenemen.

Wil de diepe afvoer op een komgrondprofiel in voldoende mate mogelijk zijn bij een redelijke afstand tussen de open watergangen, dan moet het ontwateringssysteem in de goed doorlatende ondergrond gelegen zijn. In dat geval is het mogelijk, dat bij grote doorlatendheid van de ondergrond op kavels met een slootafstand van circa 50 m geen verder ontwateringssysteem nodig is.

Is echter het ontwateringssysteem in de slecht doorlatende laag gelegen, dan vergt de radiale weerstand voor de diepe grondwaterstroming een zodanig potentiaalverschil, dat slechts bij zeer kleine afstanden de diepe afvoer in voldoende mate plaats vindt. Bij grotere afstanden tussen de open watergangen zal de diepe afvoer verminderen en de ondiepe afvoer toenemen.

De invloed van het peil in de open watergang op de potentiaal in de goed doorlatende ondergrond en op de verhouding tussen de diepe en ondiepe afvoer kan met het volgende voorbeeld worden toegelicht.

In figuur 5a is het verband weergegeven tussen het slootpeil en de potentiaal in de goed doorlatende ondergrond, beide uitgedrukt in cm -mv, gedurende de herfst van 1954 op een vijftigtal percelen in de Tielerwaard, die ontwaterd werden door sloten en greppels; figuur 5b geeft het verband tussen het slootpeil en het potentiaalverschil in de goed doorlatende ondergrond.

Hieruit blijkt, dat een verlaging van het slootpeil ook een verlaging van de potentiaal in de goed doorlatende ondergrond ten gevolge heeft, echter in mindere mate, zodat het potentiaalverschil toeneemt. Voor dit verschil tussen het slootpeil en de potentiaal in de goed doorlatende ondergrond geldt vergelijking 2.7:

$$\Delta h_3 = \frac{a_3 l^2}{8 K_3 D'_3} + a_3 l w$$

Uit het onderzoek bleek, dat er geen correlatie bestond tussen het slootpeil enerzijds en de slootafstand, de dikte en de doorlaatfactor van de goed doorlatende ondergrond en de radiale weerstand anderzijds. De toename van het potentiaalverschil bij een lager slootpeil kan derhalve niet veroorzaakt zijn door de toename van de slootafstand of van de radiale weerstand of afname van de dikte en doorlaatfactor van de goed doorlatende ondergrond, maar slechts door een toename van de diepe afvoer.

De slootafstand bleek evenmin gecorreleerd te zijn met de andere factoren die van invloed zijn op de ontwateringstoestand. In een poldergebied als de Tielerwaard is de slootafstand in het verleden niet gebaseerd op verschillen in de ontwateringstoestand, maar is een gevolg geweest van de perceelsoverdeling bij de ontginning en de eventuele latere splitsing of samenvoeging van de percelen. Dit is

FIG. 5a. Verband tussen het slootpeil in cm -mv en de potentiaal in de goed doorlatende ondergrond (h_3) in cm -mv op 50 percelen in de Tielerwaard gedurende de herfst van 1954

FIG. 5b. Verband tussen het slootpeil in cm -mv en het potentiaalverschil in de goed doorlatende ondergrond (Δh_3) in cm. Een lager slootpeil leidt tot een groter potentiaalverschil en een toename van de diepe afvoer

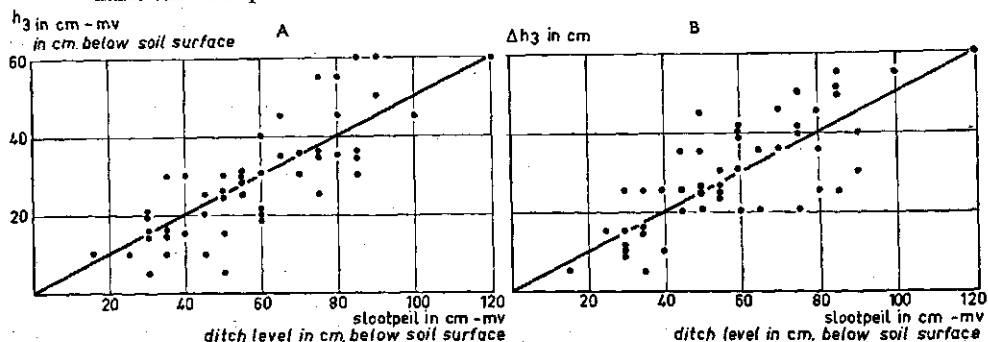


FIG. 5a. Relation between the water level in the ditch and the potential in the high-permeable subsoil (h_3) in cm. below surface on 50 parcels in the 'Tielerwaard' during autumn 1954

FIG. 5b. Relation between the water level in the ditch in cm. below surface and the potential difference in the high-permeable subsoil (Δh_3) in cm. A lower water level in the ditch gives a greater potential difference and an increase of the deep discharge

waarschijnlijk in de meeste polders het geval. De slootafstand kan derhalve niet beschouwd worden als een maatstaf voor de ontwateringsbehoefte van het perceel. Als zodanig zal wel het al of niet aanwezig zijn van een begroeiing en de greppelafstand beschouwd kunnen worden, mits de afwateringstoestand geen ingrijpende wijzigingen heeft ondergaan.

b. De niet-stationaire stroming

In het geval van de stationaire stroming wordt een evenwicht verondersteld tussen de aanvoer door de neerslag en de afvoer naar de open watergang, waarbij de grondwaterstand constant blijft. In de theorie van de niet-stationaire stroming gaat men daarentegen uit van de veronderstelling, dat tijdens de neerslagperiode de grondwaterstand en de afvoer toenemen, althans niet constant zijn, en na het einde van de neerslagperiode weer afnemen. De grondwaterzone wordt als een reservoir gezien, waarvan de inhoud enerzijds toeneemt door de zakwaterstroom die van de neerslag afkomstig is, en anderzijds afneemt door de afvoer naar de open watergang.

Hierdoor worden voor de formulering van de niet-stationaire stroming twee grootheden van belang, die niet in de stationaire formules voorkomen, namelijk de zaknelheid van de neerslag in de onverzadigde zone en de bergingscoëfficiënt van de grond.

Voor het geval, dat de dikte van de doorstroomde laag als constant wordt verondersteld, werden door KRAIJENHOFF VAN DE LEUR (15) formules voor de afvoer en de grondwaterstand afgeleid. Voor een komgrondprofiel kunnen deze in de volgende vorm geschreven worden:

$$(a_3)_t = c_1 p \quad (2.12)$$

$$(\Delta h_3)_t = c_2 \frac{p^2}{8 K_3 D'_3 P} \quad (2.13)$$

Hierin is p de zaksnelheid, waarmee de neerslag zich bij de grondwaterzone voegt. De coëfficiënten c_1 en c_2 , die ontleend kunnen worden aan de tabellen van KRAIJENHOFF VAN DE LEUR (16) en waarvoor naar bijlage 2 verwezen wordt, zijn afhankelijk van de duur van de zakwaterstroming (b is het tijdsinterval met een constante zaksnelheid) en van de reservoir coëfficiënt j , die op de volgende wijze samenhangt met de bergingscoëfficiënt μ :

$$j = \frac{\mu I^2}{\pi^2 K_3 D'_3} \quad (2.14)$$

Tijdens de stationaire stroming bestaat er volgens de vergelijkingen 2.4 en 2.7 een constante verhouding tussen de diepe afvoersnelheid en het potentiaalverschil in de goed doorlatende ondergrond. Tijdens de niet-stationaire stroming is dit echter niet het geval, hetgeen toegelicht kan worden met figuur 6a en b. Bij eenzelfde potentiaal midden tussen de open watergangen is het verloop van de potentiaal tussen de watergangen niet gelijk tijdens de periode van stijging en van daling. Daar de potentiaal op korte afstand van de open watergang tijdens de stijging hoger is dan tijdens de daling (figuur 6a), is het verhang en daarmee de afvoersnelheid groter (figuur 6b). Naarmate de zakwaterstroming langer duurt en de reservoircoëfficiënt kleiner is, wordt de lus in figuur 6b nauwer. Tevens wordt dan het verschil tussen de constante verhouding van de afvoersnelheid en het potentiaalverschil volgens een stationaire vergelijking en de verhouding volgens een niet-stationaire vergelijking geringer.

Als onderdeel van de daling treedt het zogenaamde staartverloop op, waarin wel een constante verhouding tussen de afvoersnelheid en het potentiaalverschil bestaat. Voor

FIG. 6a. De vorm der potentiaal in de goed doorlatende ondergrond tussen de open watergangen tijdens de periode van stijging (— · — · —) en daling (—) bij eenzelfde potentiaal midden tussen de open watergangen. 1 = goed doorlatende bovenlaag; 2 = slecht doorlatende laag; 3 = goed doorlatende ondergrond

FIG. 6b. Verband tussen de diepe afvoersnelheid (a_3) en het potentiaalverschil in de goed doorlatende ondergrond (Δh_3) tijdens een afvoerperiode

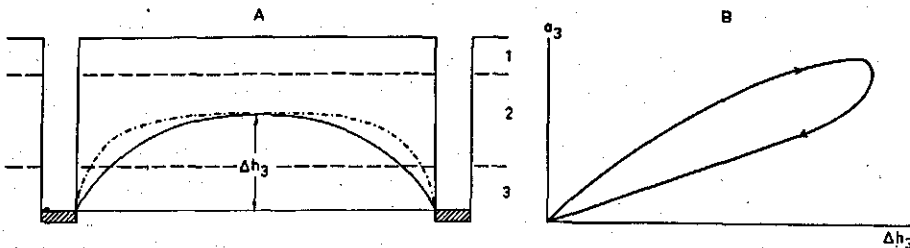


FIG. 6a. The shape of the potential in the high-permeable subsoil, between the ditches or tile lines during a period of rise (— · — · —) and fall (—) at the same potential midway between the ditches or tile lines. 1 = high-permeable surface layer; 2 = low-permeable layer; 3 = high-permeable subsoil

FIG. 6b. Relation between the rate of deep discharge (a_3) and the potential difference in the high-permeable subsoil (Δh_3) during a discharge period

een komgrondprofiel geldt dan naar analogie van KRAIJENHOFF VAN DE LEUR:

$$\Delta h_3 = \frac{a_3 t^2}{2\pi K_3 D'_3} \quad (2.15)$$

Gedurende het staartverloop is zowel het verband van de afvoersnelheid met de tijd, als het verband van het potentiaalverschil met de tijd op halfflogaritmisch papier bij benadering een rechte lijn, waarvoor geldt (figuur 7):

$$\cot \alpha = 2,303 j \quad (2.16)$$

FIG. 7. Verband van het potentiaalverschil in de goed doorlatende ondergrond (Δh_3) in cm en de diepe afvoersnelheid (a_3) in mm/dag met de tijd (T) in dagen gedurende het staartverloop van een afvoerperiode

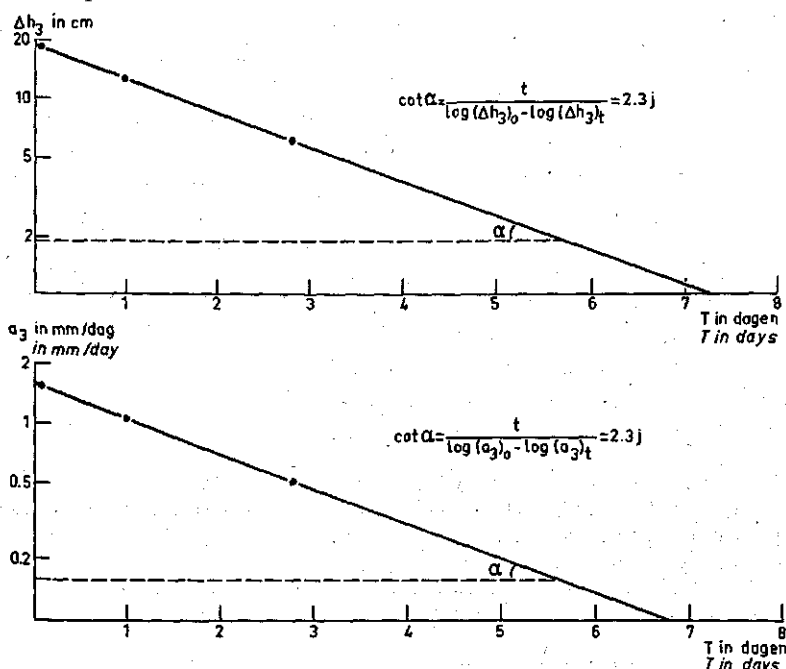


FIG. 7. Relation of the potential difference in the high-permeable subsoil (Δh_3) in cm, and the deep discharge (a_3) in mm/day with the time (T) in days during the tail recession of a discharge period

In de vergelijkingen 2.13, 2.14 en 2.15 geeft D'_3 de dikte van de goed doorlatende laag beneden het peil van de open watergang weer. Bij de afleiding werd door KRAIJENHOFF VAN DE LEUR verondersteld, dat de radiale weerstand verwaarloosd kon worden. Daar dit in een komgrondprofiel doorgaans niet het geval is, zal door de auteur van de onderhavige publikatie bij toepassing van deze vergelijking in plaats van D'_3 een aequivalentlaag d worden toegepast, waarin de radiale weerstand is verwerkt.

Een tweede mogelijkheid voor de berekening van de afvoersnelheid en het potentiaalverschil is de door DE ZEEUW en HELLINGA (33) ontwikkelde methode, waarbij

gedurende het gehele afvoerproces een constant verband tussen de afvoersnelheid en het potentiaalverschil volgens vergelijking 2.4 wordt verondersteld.

Wanneer in een zeker tijdvak een neerslagoverschot $(N-V)_t$ is opgetreden en de diepe afvoersnelheid en het potentiaalverschil in de goed doorlatende ondergrond aan het begin van dit tijdvak respectievelijk $(a_3)_0$ en $(\Delta h_3)_0$ bedragen, geldt voor de afvoersnelheid en het potentiaalverschil op het tijdstip t :

$$(a_3)_t = (a_3)_0 e^{-\alpha t} + (N-V)_t - (N-V)_t e^{-\alpha t} \quad (2.17)$$

$$(\Delta h_3)_t = (\Delta h_3)_0 e^{-\alpha t} + \frac{l^2}{8 K_3 d} (N-V)_t - \frac{l^2}{8 K_3 d} (N-V)_t e^{-\alpha t} \quad (2.18)$$

De waarde α , die de intensiteitsfactor genoemd wordt, komt vrijwel overeen met de reciproke waarde van de reservoircoëfficiënt, zoals uit een vergelijking van de formules 2.19 en 2.14 blijkt:

$$\alpha = \frac{32 K_3 d}{\pi \mu l^2} = \frac{1,03 \pi^2 K_3 d}{\mu l^2} \quad (2.19)$$

De toepassingen van de vergelijkingen 2.17 en 2.18 is op eenvoudige wijze mogelijk, daar de eerste en derde term van de vergelijkingen grafisch bepaald kunnen worden op halflogaritmisch papier. Bij langdurige regenval kan als lengte van elk tijdvak die periode gekozen worden, waarover de neerslag als gelijkmatig verdeeld verondersteld wordt. Is het neerslagoverschot gelijk aan nul, dan blijft de eerste term over die, behalve het verschil tussen α en j , overeenkomt met de betrekking die volgens KRAIENHOFF VAN DE LEUR tijdens het staartverloop geldt.

Ter vergelijking is het verloop van de diepe afvoersnelheid en het potentiaalverschil in de goed doorlatende ondergrond berekend zowel met de vergelijkingen 2.12 en 2.13 als met de vergelijkingen 2.17 en 2.18 onder de volgende veronderstellingen. Het betreft een zevendaagse neerslagperiode, waarin het dagelijks neerslagoverschot 9, 4, 3, 3, 3, 2 en 2 mm bedraagt, waaraan geen neerslag voorafgaat en waarop geen neerslag meer volgt. Er wordt verondersteld, dat de neerslag gelijkmatig verdeeld valt over de gehele dag en dat de zakwaterstroming gelijk is aan het neerslagverloop. Van het bodemprofiel bedraagt de KD -waarde van de goed doorlatende ondergrond 1 m²/dag, de radiale weerstand 0,5 dag/m, de dikte en doorlaatfactor van de slecht doorlatende laag 0,50 m (van 0,20 tot 0,70 m -mv) en 0,05 m/dag en de bergingscoëfficiënt 0,035. Het peil in de open watergang bedraagt 0,90 m -mv. De berekening is uitgevoerd voor twee ontwateringscriteria, waarbij de afvoersnelheden respectievelijk 7 en 2 mm/dag bedragen bij een potentiaalverschil van 70 cm. Bij deze ontwateringscriteria bedragen de reservoircoëfficiënten 2,5 en 9,5 dag en de afstanden tussen de open watergangen 25 en 50 m.

In tabel 2 is het resultaat van de berekening weergegeven. Hieruit blijkt, dat bij toepassing van de vergelijkingen 2.12 en 2.13 aanvankelijk een hogere afvoersnelheid en vervolgens een lagere afvoersnelheid berekend wordt dan bij toepassing van de vergelijkingen 2.17 en 2.18, terwijl het potentiaalverschil eerst lager en later vrijwel

TABEL 2. De diepe afvoersnelheid (a_s) in mm/dag en het potentiaalverschil in de goed doorlatende ondergrond (Δh_s) in cm, berekend met de vergelijkingen 2.12, 2.13 en met de vergelijkingen 2.17, 2.18 voor twee ontwateringscriteria, waarvan de reservoircoëfficiënten 2,5 en 9,5 dag bedragen. Het betreft een 7-daagse neerslagperiode, waarin het dagelijks neerslagoverschot 9, 4, 3, 3, 3, 2 en 2 mm bedraagt

Tijd in dagen	j = 2,5 dag				j = 9,5 dag			
	2.12 a_s	2.13 Δh_s	2.17 a_s	2.18 Δh_s	2.12 a_s	2.13 Δh_s	2.17 a_s	2.18 Δh_s
1	4,1	24,5	3,1	28	2,1	27,5	1,0	31
2	3,4	29,5	3,5	30,5	1,8	36,5	1,3	42
3	3,1	28,5	3,3	29,5	1,7	44,5	1,5	48
4	3,0	28	3,2	28,5	1,8	49,5	1,7	53
5	2,9	27,5	3,1	27,5	2,0	55	1,8	58
6	2,5	24	2,8	24	1,9	56,5	1,8	59
7	2,3	22	2,5	22	1,9	58	1,8	60
8	1,4	14,5	1,6	14,5	1,4	52,5	1,6	54
9	0,9	9,5	1,1	9,5	1,2	48	1,4	48,5
10	0,6	6,5	0,7	6,5	1,0	43	1,3	43,5
11	0,4	4	0,5	4	0,9	39	1,1	39
12	0,3	2,5	0,3	2,5	0,8	35	1,0	35
13	0,2	1,5	0,2	1,5	0,7	31,5	0,9	31,5
14	0,1	1	0,1	1	0,6	28	0,8	28
Time in days	a_s 2.12	Δh_s 2.13	a_s 2.17	Δh_s 2.18	a_s 2.12	Δh_s 2.13	a_s 2.17	Δh_s 2.18
	j = 2.5 day				j = 9.5 day			

TABLE 2. The rate of deep discharge (a_s) in mm/day and the potential difference in the high-permeable subsoil (Δh_s) in cm., calculated with the equations 2.12, 2.13 and with the equations 2.17, 2.18, for two drainage criteria with a reservoir coefficient of 2.5 and 9.5 day. The calculation concerns a seven-day-period with a daily precipitation surplus of 9, 4, 3, 3, 3, 2 and 2 mm.

gelijk is. Het verschil tussen beide berekeningen is relatief groter bij een hogere reservoircoëfficiënt.

De reservoircoëfficiënt kan als volgt berekend worden: Wanneer in vergelijking 2.14 in plaats van de laagdikte D' , de equivalentelaag d mag worden toegepast in verband met de radiale weerstand, kan de waarde $l^2/K_s d$ vervangen worden volgens vergelijking 2.4 door de waarde $8\Delta h_s/a_s$, d.w.z. 8 maal de verhouding tussen het potentiaalverschil in de goed doorlatende ondergrond en de diepe afvoersnelheid in de stationaire toestand. De reservoircoëfficiënt bedraagt dan:

$$j = \frac{8\mu \Delta h_s}{\pi^2 a_s} \quad (2.20)$$

Bij het ontwateringscriterium met een afvoersnelheid van 7 mm/dag en een potentiaalverschil van 70 cm bedraagt $\Delta h_s: 0,007 \times \frac{0,50}{0,05} = 0,07$ m, zodat voor Δh_s 63 cm beschikbaar is. Derhalve:

$$j = \frac{8 \times 0,035 \times 0,63}{9,9 \times 0,007} = 2,5 \text{ dag}$$

De afstand tussen de open watergangen kan berekend worden met vergelijking 2.8 zoals in het voorbeeld van paragraaf II, 2a.

De berekening met de vergelijkingen 2.12 en 2.13 kan met het volgende voorbeeld toegelicht worden. De berekening vindt plaats volgens het beginsel van superpositie, waarbij elke periode met een andere zaksnelheid een bijdrage tot de afvoersnelheid en het potentiaalverschil levert. In dit geval bedraagt elke periode 1 dag en de zaksnelheid respectievelijk 9, 4, 3, 3, 2 en 2 mm/dag. Bij het ontwateringscriterium met een afvoersnelheid van 7 mm/dag en een potentiaalverschil van 70 cm bedraagt j 2,5 dag en de waarde $l^2/8K_3d = \Delta h_3/a_3$ 90 dag.

Op het tijdstip $t = 1$ dag bedraagt het quotiënt b/j 0,4, waarbij volgens de tabel [(16), zie bijlage 2] $c_1 = 0,45$ en $c_2 = 0,30$.

$$\begin{aligned} a_3 &= 0,45 \times 9 &= 4,1 \text{ mm/dag} \\ \Delta h_3 &= 0,30 \times 90 \times 9 = 243 \text{ mm} \end{aligned}$$

Vanaf het tijdstip $t = 1$ dag is de eerste periode van de zakwaterstroming geëindigd. Dit wordt in rekening gebracht door deze periode te laten doorlopen, maar hiervan af te trekken eenzelfde zaksnelheid, die op dit tijdstip begint en dus samenvalt met de tweede periode van de zakwaterstroming.

Op het tijdstip $t = 2$ dag bedraagt het quotiënt b/j van de eerste periode van de zakwaterstroming 0,8, waarbij $c_1 = 0,63$ en $c_2 = 0,53$, en het quotiënt b/j van de tweede periode van de zakwaterstroming weer 0,4.

$$\begin{aligned} a_3 &= (0,63 - 0,45) \times 9 &+ 0,45 \times 4 &= 1,6 + 1,8 = 3,4 \text{ mm/dag} \\ \Delta h_3 &= (0,53 - 0,30) \times 90 \times 9 + 0,30 \times 90 \times 4 = 186 + 108 = 294 \text{ mm} \end{aligned}$$

Op het tijdstip $t = 3$ dag bedraagt het quotiënt b/j van de eerste periode van de zakwaterstroming 1,2, waarbij $c_1 = 0,75$ en $c_2 = 0,69$ en de quotiënten van de tweede en derde periode van de zakwaterstroming 0,8 en 0,4.

$$\begin{aligned} a_3 &= (0,75 - 0,63) \times 9 &+ (0,63 - 0,45) \times 4 &+ 0,45 \times 3 &= 1,1 + 0,7 + 1,3 = 3,1 \text{ mm/dag} \\ \Delta h_3 &= (0,69 - 0,53) \times 90 \times 9 + (0,53 - 0,30) \times 90 \times 4 + 0,30 \times 90 \times 3 = 128 + 82 + 81 = 291 \text{ mm} \end{aligned}$$

Voor de eerste periode van de zakwaterstroming kan op het tijdstip $t = 3$ dag ook een andere methode gevolgd worden. Volgens KRAJENHOFF VAN DE LEUR kan het tijdstip T_0 , waarop het staartverloop begint, berekend worden uit de betrekking $\frac{T_0 - b}{j}$, waarin b de lengte van de periode met een bepaalde zaksnelheid is. Voor een periode, die 1 dag duurt, bedraagt b/j 0,4, waarbij volgens de tabel (16) $\frac{T_0 - b}{j}$ 0,43 bedraagt, waaruit voor T_0 een waarde van 2 dag volgt. Vanaf het tijdstip

$t = 2$ dag kunnen a_3 en Δh_3 bepaald worden uit het verband tussen deze waarden en de tijd, dat op halflogaritmisch papier een rechte is met $\cot \alpha = 2,3$ $j = 5,7$. In figuur 7 is dit verband weergegeven. Wanneer bij het begin van het staartverloop Δh_3 en a_3 respectievelijk 186 mm en 1,6 mm/dag bedragen, volgen hieruit na 1 dag de waarden 125 mm en 1,1 mm/dag. Het interpoleren bij de aflezing kan enige onnauwkeurigheid veroorzaken.

Bij de berekeningsmethode met de vergelijkingen 2.17 en 2.18 kunnen de eerste en derde term grafisch bepaald worden op halflogaritmisch papier op dezelfde wijze als tijdens het staartverloop bij de eerste berekeningsmethode.

3. DE ONDIEPE GRONDWATERSTROMING

De ondiepe grondwaterstroming vindt in horizontale richting plaats door de zode-laag of de bouwvoor. De bodem van het ontwateringsstelsel, hetzij sloten, hetzij drains of greppels, is onder of op de scheiding van de slecht doorlatende laag gelegen, die voor de ondiepe grondwaterstroming als een ondoorlatende basis beschouwd kan

worden. Voor de berekening van de ondiepe afvoersnelheid in stationaire toestand kan de volgende vergelijking toegepast worden:

$$a_1 = \frac{4K_1 \Delta h_1^2}{l^2} \quad (2.21)$$

Ten gevolge van een zekere kwelhoogte voor de toetreding van water tot de open watergang en van een zeker drukverlies in verband met de verticale stroming naar de slecht doorlatende laag zal het beschikbare potentiaalverschil voor de stroming door de zodelaag kleiner zijn dan Δh_1 . Bij toepassing van Δh_1 in vergelijking 2.21 kan echter de ondiepe afvoersnelheid in stationaire toestand bij benadering berekend worden, waarvoor deze vergelijking in hoofdstuk IV zal worden gebruikt.

Voor de ondiepe grondwaterstroming in niet-stationaire toestand kunnen geen vergelijkingen afgeleid worden in de vorm van 2.12 en 2.13, daar de dikte van de doorstroomde laag niet constant is. Voor het geval, dat de ondiepe grondwaterstand over de gehele afstand tussen de open watergangen tot een hoogte Δh_1 boven de slecht doorlatende laag is gestegen en geen ronding aanwezig is, kan een door FUKUDA (9) theoretisch afgeleide en aan modelproeven getoetste vergelijking toegepast worden:

$$a_1 = \frac{1,486 K_1 \Delta h_1}{l} \quad (2.22)$$

Met behulp van vergelijking 2.22 kan de maximale ondiepe afvoersnelheid berekend worden, indien de bovenlaag volledig verzadigd is over de gehele afstand tussen de open watergangen.

4. SAMENVATTING

Het komgrondprofiel wordt gekenmerkt door het voorkomen van een goed doorlatende bovenlaag, een slecht doorlatende tussenlaag en een goed doorlatende ondergrond.

In een komgrondprofiel vindt zowel diepe afvoer door de slecht doorlatende laag en de goed doorlatende ondergrond plaats, als ondiepe afvoer door de zodelaag of bouwvoor. Oppervlakte-afvoer over het maaiveld kan onder bijzondere omstandigheden optreden.

Het voorkomen van de ondiepe afvoer wordt bepaald door de verhouding tussen de regenintensiteit en de indringingssnelheid in de slecht doorlatende laag. Voor de tweede factor is de potentiaal van de goed doorlatende ondergrond van belang. Derhalve kan men de verhouding tussen de diepe en de ondiepe afvoer wijzigen door middel van die factoren, waarmee men de potentiaal van de goed doorlatende ondergrond kan beïnvloeden, namelijk de afstand tussen de open watergangen, het peil van de open watergang en de ligging van de open watergang ten opzichte van de goed doorlatende ondergrond.

Voor de ontwatering kunnen zowel sloten en drains, als sloten en greppels worden toegepast. Bij de ontwatering door middel van sloten en drains moet de bodem van

het ontwateringsstelsel in de goed doorlatende ondergrond gelegen zijn, wil de diepe afvoer in voldoende mate plaats vinden bij een redelijke afstand. Is de bodem van het ontwateringsstelsel echter in de slecht doorlatende laag gelegen dan zal, tengevolge van de zeer grote radiale weerstand voor de diepe grondwaterstroming, de afvoer overwegend als ondiepe afvoer plaats vinden. In dit geval zal een ontwatering door middel van sloten en drains nauwelijks een lagere grondwaterstand ten gevolge hebben dan een ontwatering door middel van sloten en greppels.

In hoofdstuk II wordt een overzicht gegeven van de in de literatuur beschikbare gegevens, waarmee de grondwaterstroming kan worden geanalyseerd.

III. BEPALING VAN ENIGE HYDROLOGISCHE GROOTHEDEN

1. DE DOORLAATFACTOR EN DIKTE VAN DE GOED DOORLATENDE ONDERGROND EN DE RADIALE WEERSTAND

a. *Bepaling door middel van de grondwaterstands-debietmethode*

Op percelen die ontwaterd worden door sloten, drains of greppels, kan de doorlaatfactor berekend worden uit het verband tussen de grondwaterstand en de afvoer van het ontwateringssysteem. Hierdoor wordt de gemiddelde doorlaatfactor van een betrekkelijk grote oppervlakte incens bepaald. Het bezwaar, dat alleen de doorlaatfactor beneden de grondwaterstand bepaald kan worden, geldt niet voor de doorlatende ondergrond van een komgrondprofiel. Tijdens afvoerperioden is deze laag in het algemeen geheel of vrijwel geheel beneden de grondwaterstand gelegen. Deze methode, die door HOOGHOUT (12) uitvoerig beschreven is, zal voor een komgrondprofiel nader worden toegelicht.

a1. *Methode.* Bij de behandeling van de stationaire stroming in hoofdstuk II werd in zoverre een vereenvoudiging toegepast, dat de horizontale stroming door de goed doorlatende ondergrond boven het peil van de open watergang verwaarloosd werd ten opzichte van die beneden het peil van de open watergang. Dit behoeft echter niet steeds het geval te zijn, namelijk wanneer de dikte van de goed doorlatende ondergrond boven het peil van de open watergang ongeveer even groot is als of groter dan die beneden het peil daarvan, zoals op het drainageproefveld in het Hollanderbroek voorkomt.

FIG. 8a. De potentiaal in de goed doorlatende ondergrond (3) ligt beneden de slecht doorlatende laag (2). Houdt men rekening met de horizontale stroming beneden en boven het peil van de open watergang, dan geldt vergelijking 3.1 voor de diepe afvoersnelheid

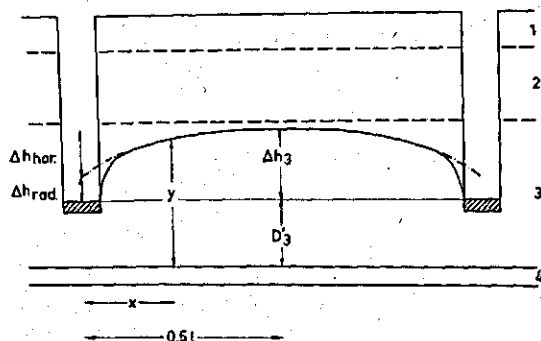


FIG. 8a. The potential in the high-permeable subsoil (3) is situated below the low-permeable layer (2). Taking into account the horizontal flow below and above the water level in the ditch or tile line, equation 3.1 is valid for the rate of deep discharge

Houdt men rekening met de stroming zowel boven als beneden het peil van de open watergang, dan geldt voor de diepe afvoersnelheid, zolang de grondwaterstand beneden de slecht doorlatende laag ligt (figuur 8a):

$$a_3 = \frac{8K_3(D'_3 + \Delta h_{rad})\Delta h_{hor}}{l^2} + \frac{4K_3\Delta h_{hor}^2}{l^2} \quad (3.1)$$

Vergelijking 3.1 kan op de volgende wijze afgeleid worden. Volgens de wet van Dupuit-Darcy geldt voor een verticale doorsnede y op een afstand x van de open watergang in het geval van figuur 8a:

$$a_3(\frac{1}{2}l - x) = K_3 \frac{dy}{dx} y$$

Door integratie van $x = 0$ tot $x = \frac{1}{2}l$ en van $y = D'_3 + \Delta h_{rad}$ tot $y = D'_3 + \Delta h_3$ ontstaat vergelijking 3.1.

Kan de horizontale stroming boven het peil van de open watergang verwaarloosd worden, dan gaat vergelijking 3.1 over in:

$$a_3 = \frac{8K_3D'_3\Delta h_{hor}}{l^2} \quad (3.2)$$

In dit geval geldt voor het potentiaalverschil in de goed doorlatende ondergrond vergelijking 2.7 en er bestaat een rechtlijnig verband tussen het potentiaalverschil en de diepe afvoersnelheid:

$$\Delta h_3 = \frac{a_3 l^2}{8K_3D'_3} + a_3 l w \quad (2.7 = 3.3)$$

Kan daarentegen de horizontale stroming beneden het peil van de open watergang verwaarloosd worden (strikt genomen dient in dit geval het onderscheid op een hoogte Δh_{rad} boven het peil van de open watergang gemaakt te worden), dan gaat vergelijking 3.1 over in:

$$a_3 = \frac{4K_3\Delta h_{hor}^2}{l^2} \quad (3.4)$$

Het potentiaalverschil in de goed doorlatende ondergrond vertoont nu een kromlijinig verband met de diepe afvoersnelheid, dat kwadratisch verloopt, indien het radiale potentiaalverschil te verwaarlozen is:

$$\Delta h_3 = \sqrt{\frac{a_3 l^2}{4K_3}} + a_3 l w \quad (3.5)$$

Wanneer geen van beide termen in vergelijking 3.1 verwaarloosd kan worden, zal het verband tussen het potentiaalverschil in de goed doorlatende ondergrond en de diepe afvoersnelheid ook kromlijinig verlopen. De kromming zal sterker worden, naarmate de horizontale stroming boven het peil van de open watergang belangrijker wordt. Stijgt de diepe grondwaterstand tot in de slecht doorlatende laag, dan zal vanaf dit moment een eventueel kromlijinig verband meer en meer rechtlijnig gaan verlopen.

Er kan onderscheid gemaakt worden, naar gelang het radiale potentiaalverschil

FIG. 8b. De potentiaal in de goed doorlatende ondergrond (3) ligt in de slecht doorlatende laag (2). Het radiale potentiaalverschil is kleiner dan de dikte van de goed doorlatende ondergrond boven het peil van de open watergang. Houdt men rekening met de horizontale stroming beneden en boven het peil van de open watergang, dan geldt vergelijking 3.6 voor de diepe afvoersnelheid

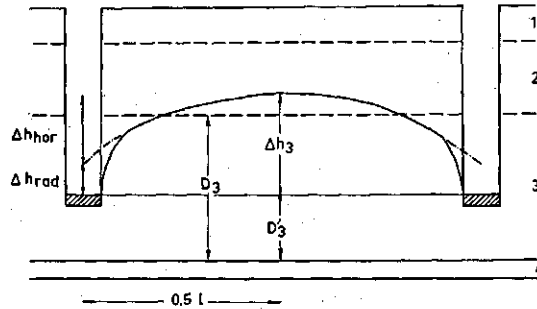


FIG. 8b. The potential in the high-permeable subsoil (3) is situated in the low-permeable layer (2). The radial potential difference is smaller than the height of the high-permeable subsoil above the water level in the ditch or tile line. Taking into account the horizontal flow below and above the water level in the ditch or tile line, equation 3.6 is valid for the rate of deep discharge

kleiner of groter is dan de dikte van de goed doorlatende ondergrond boven het peil van de open watergang. In het eerste geval (figuur 8b) geldt voor de diepe afvoersnelheid:

$$a_3 = \frac{8 K_3 D_3 (D'_3 + \Delta h_3)}{l^2} - \frac{4 K_3 [D_3^2 + (D'_3 + \Delta h_{rad})^2]}{l^2} \quad (3.6)$$

Voor een profiel, bestaande uit een bovenlaag met een doorlaatfactor K_2 en een onderlaag met een doorlaatfactor K_1 en voor het geval dat de grondwaterstand in de bovenlaag en het peil van de open watergang in de onderlaag gelegen is, werd door HOOGHOUT (12) de volgende betrekking afgeleid:

$$a = \frac{8}{l^2} [\frac{1}{2} K_2 H_0^2 + K_1 (1 - n_1) h_1 H_0 - \frac{1}{2} K_1 h_1^2 (n_1 - 1) - \frac{1}{2} K_1 h_0^2]$$

waarin H_0 en h_0 de hoogte van de grondwaterstand boven de ondoorlatende laag respectievelijk midden tussen de open watergangen en ter plaatse van de open watergang voorstellen, h_1 de dikte van de onderlaag en n_1 de verhouding K_2/K_1 . Voor het in figuur 8b weergegeven geval van een komgrond-profiel is $H_0 = D'_3 + \Delta h_3$, $h_1 = D_3$ en $K_1 = K_3$. Wanneer de horizontale stroming in de slecht doorlatende laag verwaarloosd wordt ten opzichte van die in de goed doorlatende ondergrond, d.w.z. de termen met K_2 en n_1 verwaarloosd worden, gaat bovenstaande vergelijking over in:

$$a_3 = \frac{8}{l^2} [K_3 D_3 (D'_3 + \Delta h_3) - \frac{1}{2} K_3 D_3^2 - \frac{1}{2} K_3 (D'_3 + \Delta h_{rad})^2]$$

$$a_3 = \frac{8 K_3 D_3 (D'_3 + \Delta h_3)}{l^2} - \frac{4 K_3 [D_3^2 + (D'_3 + \Delta h_{rad})^2]}{l^2}$$

Wanneer het radiale potentiaalverschil groter is dan de dikte van de goed doorlatende ondergrond boven het peil van de open watergang (figuur 8c), geldt voor de diepe afvoersnelheid:

$$a_3 = \frac{8 K_3 D_3 \Delta h_{hor}}{l^2} \quad (3.7)$$

FIG. 8c. De potentiaal in de goed doorlatende ondergrond (3) ligt in de slecht doorlatende laag (2). Het radiale potentiaalverschil is groter dan de dikte van de goed doorlatende ondergrond boven het peil van de open watergang. Houdt men rekening met de horizontale stroming beneden en boven het peil van de open watergang, dan geldt vergelijking 3.7 voor de diepe afvoersnelheid

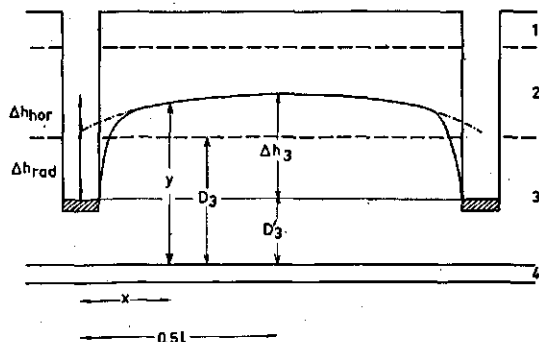


FIG. 8c. The potential in the high-permeable subsoil (3) is situated in the low-permeable layer (2). The radial potential difference is greater than the height of the high-permeable subsoil above the water level in the ditch or tile line. Taking into account the horizontal flow below and above the water level in the ditch or tile line, equation 3.7 is valid for the rate of deep discharge

Het verband tussen het potentiaalverschil in de goed doorlatende ondergrond en de diepe afvoersnelheid verloopt nu rechtlijnig:

$$\Delta h_3 = \frac{a_3 l^2}{8 K_3 D_3} + a_3 l w \quad (3.8)$$

Vergelijking 3.7 kan op de volgende wijze afgeleid worden. Volgens de wet van Dupuit-Darcy geldt voor een verticale doorsnede y op een afstand x van de open watergang in het geval van figuur 8c:

$$a_3 \left(\frac{1}{2} l - x \right) = K_3 \frac{dy}{dx} \cdot D_3$$

Door integratie van $x = 0$ tot $x = \frac{1}{2} l$ en van $y = D'_3 + \Delta h_{rad}$ tot $y = D'_3 + \Delta h_3$ ontstaat vergelijking 3.8.

Uit het verband tussen het potentiaalverschil in de goed doorlatende ondergrond en de diepe afvoersnelheid kan dus afgeleid worden, in hoeverre de horizontale stroming beneden en boven het peil van de open watergang plaats vindt (figuur 9). Is het verband geheel rechtlijnig, dan vindt de stroming beneden het peil van de open watergang plaats. Is het verband kromlijinig, dan vindt de stroming ook boven het peil van de open watergang plaats en wel meer, naarmate de kromming sterker is.

Voor de berekening van de doorlaatfactor en de dikte van de goed doorlatende laag en de radiale weerstand moet het potentiaalverschil in de goed doorlatende ondergrond worden gesplitst in het horizontale en het radiale potentiaalverschil.

Wanneer de horizontale stroming zowel beneden als boven het peil van de open watergang plaats vindt en de grondwaterstand beneden de slecht doorlatende laag

FIG. 9. Verband tussen de diepe afvoersnelheid (a_3) en het potentiaal verschil in de goed doorlatende ondergrond (Δh_3) in het geval van stationaire stroming.

I. De horizontale stroming boven het peil van de open watergang is te verwaarlozen.

II en III. Er vindt ook horizontale stroming boven het peil van de open watergang plaats en wel meer, naarmate de kromming sterker is. Stijgt de potentiaal, gemeten in de goed doorlatende ondergrond, tot in de slecht doorlatende laag, dan nadert de kromme weer tot een rechte lijn

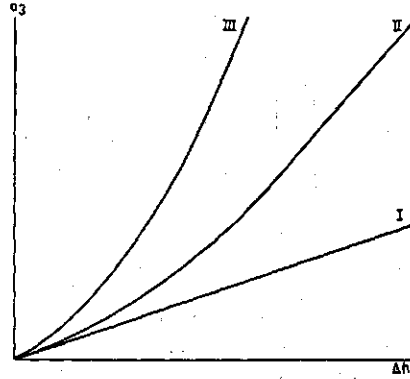


FIG. 9. Relation of the rate of deep discharge (a_3) and the potential difference in the high-permeable subsoil (Δh_3) in the case of steady-state flow.

I. The horizontal flow above the water level in the ditch or tile line can be neglected.

II and III. The horizontal flow takes also place above the water level in the ditch or tile line and increases according the curve. When the potential, measured in the high-permeable subsoil, rises into the low-permeable layer, the curve approaches again to a straight line

ligt (figuur 8a), verloopt de potentiaal in de goed doorlatende ondergrond tussen de open watergangen als een ellips, waarvoor geldt:

$$\frac{a_3}{K_3} = \frac{(D'_3 + \Delta h_3)^2 - y^2}{(\frac{1}{2}l - x)^2} \quad (3.9)$$

Vergelijking 3.9 kan op eenzelfde manier afgeleid worden als vergelijking 3.1, nu echter door te integreren van $x = x$ tot $x = \frac{1}{2}l$ en van $y = y$ tot $y = D'_3 + \Delta h_3$.

Vlakbij de open watergang buigt de potentiaal echter af naar de open waterstand. Het radiale potentiaalverschil kan nu bepaald worden als het verschil van de te berekenen potentiaal volgens de ellips ter plaatse van de open watergang en het gemeten peil van de open watergang. Dit kan grafisch (figuur 10a) geschieden door de waarde $(\frac{1}{2}l - x)^2$ uit te zetten tegen de waarde $(D'_3 + \Delta h_3)^2 - y^2$ en, door extrapolatie, bij $(\frac{1}{2}l)^2$ de waarde $(D'_3 + \Delta h_3)^2 - (D'_3 + \Delta h_{rad})^2$ te bepalen en hieruit het radiale potentiaalverschil te berekenen, waardoor ook het horizontale potentiaalverschil bekend is. Tevens geeft de tangens van de hellingshoek α de verhouding a_3/K_3 aan, waaruit K_3 berekend kan worden, indien a_3 bekend is. Daar de scheiding tussen de horizontale en radiale stroming volgens HOOGHOUT (13) op een afstand van $0,7 D'_3$ uit de open watergang gesteld kan worden, mogen bij deze werkwijze alleen waarnemingen toegepast worden, die op een afstand van meer dan $0,7 D'_3$ van uit de open watergang zijn waargenomen.

FIG. 10a. Bepaling van het radiale potentiaalverschil in het geval van een elliptische potentiaalvorm, gemeten in de goed doorlatende ondergrond. Voor de ellips geldt vergelijking 3.9

FIG. 10b. In het geval van een parabolische potentiaalvorm, gemeten in de goed doorlatende ondergrond. Voor de parabool geldt vergelijking 3.10

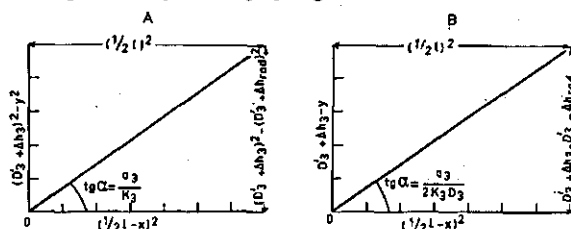


FIG. 10a. Determination of the radial potential difference in the case of an elliptical shape of the potential, measured in the high-permeable subsoil. Equation 3.9 is valid for this ellipse

FIG. 10b. In the case of a parabolical shape of the potential, measured in the high-permeable subsoil. Equation 3.10 is valid for this parabole

Wanneer de stroming boven het peil van de open watergang verwaarloosd kan worden of wanneer het radiale potentiaalverschil groter is dan de dikte van de goed doorlatende ondergrond boven het peil van de open watergang (figuur 8c), verloopt de potentiaal in de goed doorlatende ondergrond tussen de open watergangen als een parabool, waarvoor geldt:

$$\frac{a_3}{2K_3D_3} = \frac{D'_3 + \Delta h_3 - y}{(\frac{1}{2}l - x)^2} \quad (3.10)$$

Vergelijking 3.10 kan op eenzelfde wijze afgeleid worden als vergelijking 3.7, nu echter door te integreren van $x = x$ tot $x = \frac{1}{2}l$ en van $y = y$ tot $y = D'_3 + \Delta h_3$.

Wanneer men grafisch (figuur 10b) de waarde $(\frac{1}{2}l - x)^2$ uitzet tegen de waarde $D'_3 + \Delta h_3 - y$, kan men, door extrapolatie, bij $(\frac{1}{2}l)^2$ de waarde $D'_3 + \Delta h_3 - D'_3 - \Delta h_{rad} = \Delta h_{hor}$ bepalen, waardoor het horizontale en het radiale potentiaalverschil bekend zijn. De tangens van de hellingshoek α geeft nu de verhouding $a_3/2K_3D_3$ aan.

In het geval van figuur 8b zal de potentiaal, zolang deze in de slecht doorlatende laag ligt, een parabolisch en vervolgens een elliptisch verloop hebben en men kan dan één van beide methoden toepassen. Het verschil van een elliptisch met een parabolisch verloop tussen de open watergangen is namelijk gering, indien de dikte van de doorstroomde laag vrijwel constant is, zoals door ERNST (2) is aangetoond.

Bij toepassing van deze methode moet in het geval van een ellips, D'_3 en dus de ligging van de ondoorlatende laag bekend zijn. In het geval van een parabool is dit niet noodzakelijk, daar $D'_3 + \Delta h_3 - y = \Delta h_3 - y'$, waarin y' de potentiaal ten opzichte van het peil van de open watergang weergeeft.

Door VISSER (29) is voor het geval van een elliptisch verloop een methode aangegeven, die gebaseerd is op de transformatie van een ellips in een cirkel. De ellips kan in een cirkel getransformeerd worden door de potentiaal y , gemeten ten opzichte van de ondoorlatende laag, zodanig te vermenigvuldigen (figuur 11a), dat:

$$y' = \frac{e}{D'_3 + \Delta h_3} y$$

FIG. 11a. Bepaling van het radiale potentiaalverschil in het geval van een elliptische potentiaalvorm, gemeten in de goed doorlatende ondergrond. De ellips kan in een cirkel worden getransformeerd

FIG. 11b. Voor de cirkel geldt de vergelijking: (zie onder)

FIG. 11c. Bepaling van het radiale potentiaalverschil

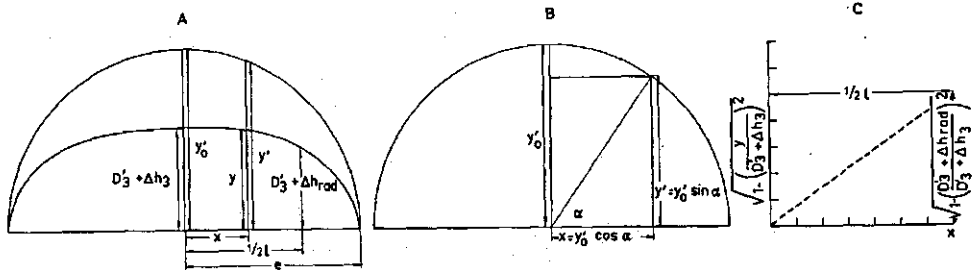


FIG. 11a. Determination of the radial potential difference in the case of an elliptical shape of the potential, measured in the high-permeable subsoil. The ellipse can be transformed in a circle

FIG. 11b. The equation for the circle is:

$$x = y'_0 \sqrt{1 - \left(\frac{y}{D'_3 + \Delta h_3} \right)^2}$$

FIG. 11c. Determination of the radial potential difference

Voor deze cirkel kan de volgende vergelijking afgeleid worden (figuur 11b):

$$x = y'_0 \sqrt{1 - \left(\frac{y}{D'_3 + \Delta h_3} \right)^2}$$

Wanneer men in een grafiek (figuur 11c) de waarde x uitzet tegen de waarde $\sqrt{1 - (y/(D'_3 + \Delta h_3))^2}$, dan kan men door extrapolatie bij $1/2 l$ de waarde $\sqrt{1 - (D'_3 + \Delta h_{rad})^2 / (D'_3 + \Delta h_3)^2}$ bepalen en hieruit het radiale potentiaalverschil berekenen.

In hoofdstuk II werd er op gewezen, dat ten gevolge van het niet-stationaire verloop tijdens een afvoerperiode geen verhouding, zoals in 3.3, 3.5 en 3.8 is weergegeven, tussen de diepe afvoersnelheid en het potentiaalverschil in de goed doorlatende ondergrond bestaat. Bij eenzelfde potentiaalverschil midden tussen de open watergangen is de potentiaal op korte afstand van de open watergang en daardoor de afvoersnelheid tijdens de stijging groter dan tijdens de daling (figuur 6). Tijdens het staartverloop van de daling, zoals gedefinieerd op blz. 15, treedt een constante verhouding tussen de afvoersnelheid en het potentiaalverschil op, die bij benadering gelijk is aan de verhouding volgens de stationaire stromingsvergelijking.

Op een komgrondprofiel moet tevens rekening gehouden worden met de mogelijkheid van ondiepe afvoer, die tijdens en direct na de neerslagperiode kan optreden. Hierdoor kan de gemeten afvoersnelheid de som van de diepe en ondiepe afvoersnelheid zijn.

Bij de toepassing van de grondwaterstands-debietmethode zal men derhalve geen gebruik moeten maken van waarnemingen, die tijdens en direct na het einde van de neerslag verkregen zijn. Hierdoor worden afwijkingen in de diepe afvoersnelheid ten gevolge van het niet-stationaire verloop van het afvoerproces en ten gevolge van de

ondiepe afvoer zoveel mogelijk voorkomen, alsmede de berekening van een te groot radiaal potentiaalverschil.

Bij deze methode wordt van de stationaire stromingsvergelijkingen gebruik gemaakt, daar deze kunnen worden toegepast indien de stroming zowel boven als beneden het peil van de open watergang plaats vindt. De niet-stationaire stromingsvergelijking kan echter alleen in het tweede geval worden toegepast.

Vergelijkt men de stationaire stromingsvergelijking 2.4 met de niet-stationaire vergelijking 2.15, waarbij ook in het laatste geval de radiale weerstand verwerkt wordt in de equivalentlaag, dan geldt voor de verhouding tussen de afvoersnelheid en het potentiaalverschil respectievelijk:

$$\frac{a_3}{\Delta h_3} = \frac{8 K_3 d}{l^2} \text{ en } \frac{a_3}{\Delta h_3} = \frac{2 \pi K_3 d}{l^2}$$

Bij toepassing van de stationaire stromingsvergelijking wordt voor het product van doorlaatfactor en equivalentlaag een waarde berekend, die $2\pi/8$ d.i. 0,8 maal de waarde bedraagt, die in het staartverloop volgens de niet-stationaire vergelijking wordt berekend.

Ook indien niet de waarnemingen verkregen tijdens en direct na de regenval worden toegepast, vertonen zij echter een zekere spreiding, die zowel aan het nog niet bereikt zijn van het staartverloop als aan toevallige waarnemingsfouten kan worden toegeschreven. In figuur 12, 15 en 16 vindt men hiervan voorbeelden, waarbij opgemerkt moet worden, dat de waarnemingen na verschillende neerslagperiodes verkregen zijn en niet beschouwd mogen worden als behorende tot het staartverloop na één neerslagperiode. Hierdoor is het de vraag, of men het verband tussen de afvoersnelheid en het potentiaalverschil moet bepalen op grond van de onderzijde of het gemiddelde van de puntenzwerm. Bij de toepassing van de grondwaterstands-debietmethode werd het verband steeds bepaald op grond van het gemiddelde, hetgeen er toe kan leiden dat meer de verhouding volgens de stationaire stromingsvergelijking dan de verhouding volgens de niet-stationaire vergelijking werd benaderd.

De afvoermetingen werden verricht met behulp van een emmer, waarin een maatverdeling tot 25 cm^3 was aangebracht en waarmee een hoeveelheid van 2 tot 6 liter werd bepaald. Wanneer de meettijd minder dan 30 sec. bedroeg, werd de meting in duplo verricht. Bij enkelvoudig gedraineerde objecten werd de afvoer van meerdere drains gemeten, bij samengesteld gedraineerde objecten de afvoer van de hoofddrain. De objecten hadden een grootte van ongeveer 0,5 ha.

Als zelfregistrerende afvoermeter werd het type beproefd, dat door WESSELING (30) beschreven wordt. Hierbij is voor de afvoeropening een plaat aangebracht, die voorzien is van een met de hoogte afnemend aantal ronde uitstroomopeningen. Bij de beproefing bleek, dat ten gevolge van het veelvuldig voorkomen van ijzerhydroxyde-afzettingen de uitstroomopeningen verstopt raakten. Ook na vervanging van deze plaat door een plaat met een enkele opening, die aan de onderzijde breed is en naar boven spleetvormig toeloopt, traden nog zodanige verstoppingen op, dat niet volstaan kon worden met het apparaat eenmaal per dag te reinigen. Derhalve werden geen zelfregistrerende afvoermeters toegepast.

De grondwaterstand werd gemeten met behulp van een meetklokje of duimstok in buizen of open boorgaten, die op verschillende afstanden tussen de drains waren geplaatst. Daar doorgaans meerdere reeksen werden gemaakt, werd hiervan het gemiddelde bepaald.

Als zelfregistrerende grondwaterstandsmeter werd het door THIJSEN e.a. (27) beschreven apparaat toegepast. De waarnemingen van dit apparaat stemden in het

algemeen goed overeen met de directe waarnemingen, die in dezelfde buis verricht werden met een duimstok. Tijdens de daling vertoonde het apparaat echter vaak enige vertraging, waardoor een schoksgewijs verloop werd geregistreerd.

Een volledig beeld van het afvoer- en grondwaterstandsverloop kon derhalve niet verkregen worden. De metingen werden verricht met een tijdsinterval, dat varieerde van 1 à 2 uur tot enige dagen, afhankelijk van de regenval. De punten in de figuren 12, 15 en 16 betreffen waarnemingen, die ten dele in dezelfde, ten dele in verschillende afvoerperioden werden verricht.

a2. *Voorbeelden.* Met behulp van de vergelijkingen uit de vorige paragraaf kunnen de volgende waarden worden bepaald: het produkt van de doorlaatfactor en de dikte van de goed doorlatende ondergrond beneden het drainniveau, de doorlaatfactor van de goed doorlatende ondergrond boven het drainniveau, de overgang naar de slecht doorlatende laag, en de radiale weerstand. Enkele voorbeelden hiervan volgen.

In figuur 12 is het verband tussen de afvoersnelheid en het potentiaalverschil in de goed doorlatende ondergrond weergegeven voor een op 20 m afstand en 0,85 m diepte gedraineerd object van het drainageproefveld in de Maaskant. Met uitzondering van enige waarnemingen die tijdens en kort na regenval gedaan werden, vertonen de waarnemingen een rechtlijnig verband. Hieruit volgt, dat de horizontale stroming boven het drainniveau verwaarloosd kan worden bij de berekening.

In figuur 13 is het verloop van de potentiaal in de goed doorlatende ondergrond

FIG. 12. Verband tussen de afvoersnelheid (a) in mm/dag en het potentiaalverschil in de goed doorlatende ondergrond (Δh_s) in cm. Het betreft een op 20 m afstand en 0,85 m diepte gedraineerd object van het drainageproefveld in de Maaskant.

- = waarnemingen tijdens en kort na regenval
- = waarnemingen langere tijd na regenval

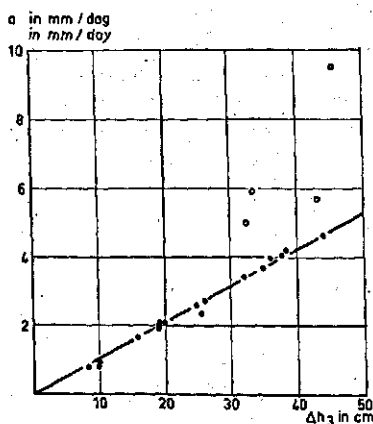


FIG. 12. Relation of the rate of discharge (a) in mm/day and the potential difference in the high-permeable subsoil (Δh_s) in cm. The observations are pertaining to a plot of the drainage experimental field in the 'Maaskant' with a drain spacing of 20 m. and a depth of 0.85 m. below surface.

- = observations during and shortly after rainfall
- = observations taken later after rainfall

tussen de drains weergegeven voor hetzelfde object, waarbij het potentiaalverschil 24,5 cm en de afvoersnelheid 2,6 mm/dag bedraagt. De berekening van het radiale potentiaalverschil is voor een parabolisch potentiaalverloop uitgevoerd en ter vergelijking ook nog voor een elliptisch verloop, waarbij in het laatste geval een ondoorlatende laag zowel op 0,5 m als op 1 m onder het drainniveau is aangenomen (figuur 14a en b). Deze berekening leverde steeds een waarde van 6,5 voor het radiale potentiaalverschil op. Er is derhalve geen merkbaar verschil tussen het verloop van de drie krommen, waarbij uiteraard het traject nabij de drains buiten beschouwing blijft. Het potentiaalverloop, dat kan worden berekend uit het verloop van de rechte lijn in figuur 14a of b, is weergegeven in figuur 13 en wijkt slechts weinig (0,5 à 1 cm) van het gemeten potentiaalverloop af.

FIG. 13. De vorm van de potentiaal, gemeten in de goed doorlatende ondergrond, bij een afvoersnelheid van 2,6 mm/dag. Het betreft het object, reeds genoemd in figuur 12.

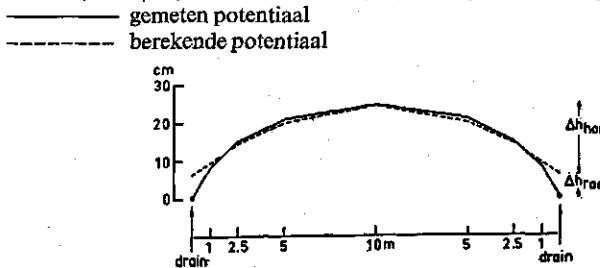


FIG. 13. The shape of the potential, measured in the high-permeable subsoil, at a rate of discharge of 2.6 mm/day. This concerns the plot, already mentioned in fig. 12.

— measured potential
 - - - calculated potential

FIG. 14a. Bepaling van het radiale potentiaalverschil voor het object reeds genoemd in figuur 12, in het geval van een parabolisch potentiaalverloop tussen de drains

FIG. 14b. In het geval van een elliptisch potentiaalverloop tussen de drains.

● — ● ondoorlatende laag op 1 m onder het drainniveau
 ○ — ○ ondoorlatende laag op 0,5 m onder het drainniveau

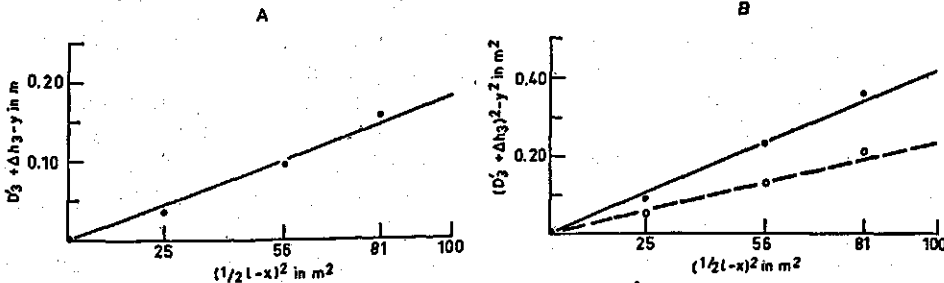


FIG. 14a. Determination of the radial potential difference for the plot already mentioned in figure 12; in the case of a parabolical shape of the potential between the tile lines

FIG. 14b. In the case of an elliptical shape of the potential between the tile lines.

● — ● impermeable layer at 1 m. below the depth of drainage
 ○ — ○ impermeable layer at 0.5 m. below the depth of drainage

Voor dit object kan bij een potentiaalverschil in de goed doorlatende ondergrond van 24,5 cm en een diepe afvoersnelheid van 2,6 mm/dag het radiale potentiaalverschil op 6,5 cm en het horizontale potentiaalverschil op 18 cm gesteld worden. Hieruit kunnen de volgende waarden berekend worden:

$$K_3 D_3 = \frac{a_3 l^2}{8 \Delta h_{hor}} = \frac{0,0026 \times 400}{8 \times 0,18} = 0,7 \text{ m}^2/\text{dag}$$

$$w = \frac{\Delta h_{rad}}{a_3 l} = \frac{0,065}{0,0026 \times 20} = 1,2 \text{ dag/m}$$

De KD -waarde kan ook berekend worden uit de tangens van de hellingshoek van figuur 14a:

$$\text{tg } \alpha = \frac{a_3}{2 K_3 D_3} = \frac{0,18}{100}$$

$$K_3 D_3 = \frac{1}{2} \times \frac{100}{0,18} \times 0,0026 = 0,7 \text{ m}^2/\text{dag}$$

In het geval van een elliptisch potentiaalverloop met een ondoorlatende laag op 1 m onder het drainniveau kan uit de tangens van de hellingshoek van figuur 14b berekend worden:

$$\text{tg } \alpha = \frac{a_3}{K_3} = \frac{0,43}{100}$$

$$K_3 = \frac{100}{0,43} \times 0,0026 = 0,6 \text{ m/dag}$$

Wanneer een elliptisch potentiaalverloop verondersteld wordt, vindt de stroming zowel boven als beneden het drainniveau plaats en bedraagt de gemiddelde dikte van de doorstroomde laag in dit geval bij benadering $1,065 + \frac{1}{2} (0 + 0,18) = 1,15 \text{ m}$. Hieruit volgt eveneens een KD -waarde van $0,7 \text{ m}^2/\text{dag}$.

In het geval van een elliptisch potentiaalverloop met een ondoorlatende laag op 0,5 m onder het drainniveau wordt wel een grotere doorlaatfactor berekend, namelijk $1,1 \text{ m/dag}$, maar bedraagt de gemiddelde dikte van de doorstroomde laag bij benadering $0,65 \text{ m}$, waaruit eenzelfde KD -waarde van $0,7 \text{ m}^2/\text{dag}$ volgt.

Wil men in dit geval de werkelijke doorlaatfactor en dikte van de goed doorlatende ondergrond afzonderlijk vaststellen, dan moet de KD -waarde volgens de grondwaterstands-debietmethode vergeleken worden met doorlatendheidsmetingen volgens de boorgatenmethode en met profieleigenschappen.

Een geheel ander verband tussen de afvoersnelheid en het potentiaalverschil in de goed doorlatende ondergrond is in figuur 15 weergegeven voor een op 25 m afstand en 1,20 m diepte gedraineerd object van het drainageproefveld in het Hollanderbroek. Uit het verband, dat eerst krom- daarna rechtlijnig verloopt, volgt, dat boven het drainniveau een goed doorlatende laag aanwezig is, die op zekere hoogte door de slecht doorlatende laag wordt begrensd. Uit het potentiaalverloop tussen de drains werd berekend, dat het radiale potentiaalverschil te verwaarlozen is.

Het potentiaalverschil in de goed doorlatende ondergrond kan derhalve gelijk gesteld worden aan het horizontale potentiaalverschil. Voor de berekening kan vergelijking 3.1 in de volgende vorm worden toegepast:

$$K_3 D'_3 + \frac{1}{2} K_3 \Delta h_{hor} = \frac{a_3 l^2}{8 \Delta h_{hor}}$$

FIG. 15. Verband tussen de afvoersnelheid (a) in mm/dag en het potentiaalverschil in de goed doorlatende ondergrond (Δh_s) in cm. Het betreft een op 25 m afstand en op 1,20 m diepte gedraïneerd object van het drainageproefveld in het Hollanderbroek.

- waarnemingen tijdens en kort na regenval
- waarnemingen langere tijd na regenval

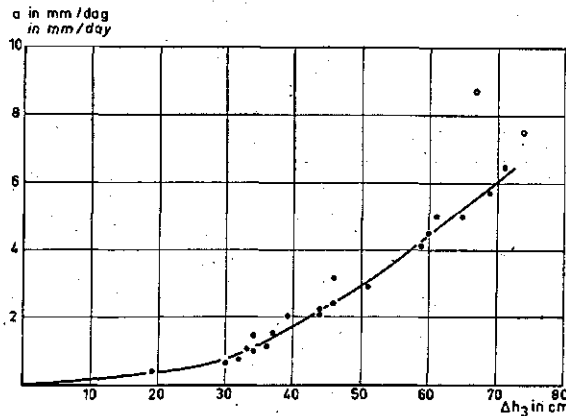


FIG. 15. Relation of the rate of discharge (a) in mm/day and the potential difference in the high-permeable subsoil (Δh_s) in cm. The observations are pertaining to a plot of the drainage experimental field in the 'Hollanderbroek' with a drain spacing of 25 m. and a depth of drainage of 1.20 m. below surface.

- observations during and shortly after rainfall
- observations taken later after rainfall

TABEL 3a. Berekening van de waarde $K_s D'_s$ en de doorlaatfactor van de goed doorlatende ondergrond uit de diepe afvoersnelheid en het horizontale potentiaalverschil. Het betreft een op 25 m afstand en 1,20 m diepte gedraïneerd object van het drainageproefveld in het Hollanderbroek

a_s in mm/dag	Δh_{hor} in cm	$K_s D'_s + \frac{1}{2} K_s \Delta h_{hor} = \frac{a_s l^2}{8 \Delta h_{hor}}$	$K_s D'_s$ in m ² /dag	K_s in m/dag
0,75	30	$K_s D'_s + 0,15 K_s = 0,20$		1,3
1,7	40	$+ 0,20 = 0,32$	0	1,6
2,9	50	$+ 0,25 = 0,46$	0	1,8
4,5	60	$+ 0,30 = 0,58$	0	1,9
6,1	70	$+ 0,35 = 0,69$	0	2,0
a_s in mm/dag	Δh_{hor} in cm.	$K_s D'_s + \frac{1}{2} K_s \Delta h_{hor} = \frac{a_s l^2}{8 \Delta h_{hor}}$	$K_s D'_s$ in m ² /dag	K_s in m/dag

TABLE 3a. Calculation of the value $K_s D'_s$ and the hydraulic conductivity of the high-permeable subsoil from the rate of deep discharge and the horizontal potential difference. The calculation concerns a plot of the drainage experimental field in the 'Hollanderbroek' with a drain spacing of 25 m. and a depth of drainage of 1.20 m.

De twee onbekenden $K_s D'_s$ en K_s kunnen opgelost worden uit twee vergelijkingen. Door het toepassen van een reeks opeenvolgende waarden van het potentiaalverschil en de afvoersnelheid worden meerdere oplossingen verkregen. Dit is uitgevoerd in tabel 3a.

Daar de waarde $K_3 D'_3$ gelijk is aan nul, komt beneden het drainniveau een slecht doorlatende laag voor, waarin geen horizontale stroming van betekenis naar de drains optreedt. De toenemende waarde van de doorlaatfactor van de goed doorlatende ondergrond bij stijging van het horizontale potentiaalverschil kan betekenen, dat de drain reeds in de slecht doorlatende laag ligt. Het rechtlijnig verloop in figuur 15 bij

TABEL 3b. Berekening van de doorlaatfactor van de goed doorlatende ondergrond met behulp van vergelijking 3.4 en 3.6 ($\Delta h_{hor} > 40$ cm) voor het in tabel 3a genoemde object. De onder- en bovenkant van de goed doorlatende ondergrond worden respectievelijk op 10 en 50 cm boven het drainniveau aangenomen

a_3 in mm/dag	Δh_{hor} in cm	K_3 in m/dag
0,75	20	2,9
1,7	30	2,9
2,9	40	2,8
4,5	50	2,9
6,1	60	3,0
a_3 in mm/day	Δh_{hor} in cm.	K_3 in m/day

TABLE 3b. Calculation of the hydraulic conductivity of the high-permeable subsoil with equations 3.4 and 3.6 ($\Delta h_{hor} > 40$ cm.) for the plot of table 3a. The lower and upper part of the high-permeable subsoil have been taken at 10 and 50 cm. above the depth of drainage

FIG. 16. Verband tussen de afvoersnelheid (a) in mm/dag en het potentiaalverschil in de goed doorlatende ondergrond (Δh_3) in cm. Het betreft een tweede, op 25 m afstand en op 1,10 m diepte gedraineerd object van het drainageproefveld in het Hollanderbroek.

- waarnemingen tijdens en kort na regenval
- waarnemingen langere tijd na regenval

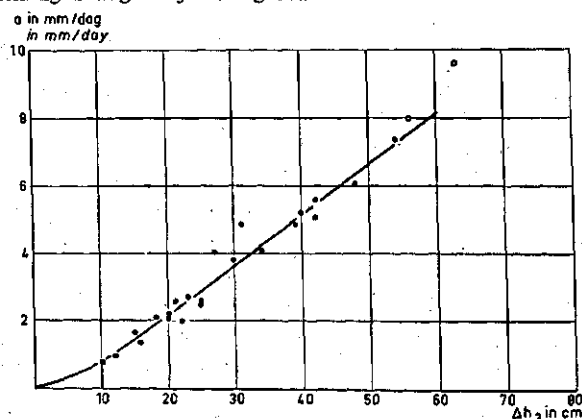


FIG. 16. Relation of the rate of discharge (a) in mm/day with the potential difference in the high-permeable subsoil (Δh_3) in cm. The observations are pertaining to a second plot of the drainage experimental field in the 'Hollanderbroek', with a drain spacing of 25 m. and a depth of drainage of 1.10 m. below surface.

- observations during and shortly after rainfall
- observations taken later after rainfall

een potentiaalverschil groter dan 50 cm wijst er op, dat de goed doorlatende laag hier aan de bovenzijde weer door een slecht doorlatende laag wordt begrensd.

Stelt men de onderkant van de goed doorlatende laag op 10 cm boven het drainniveau en de bovenkant op 50 cm boven het drainniveau, wat in dit geval 70 cm -mv is, dan kan de doorlaatfactor berekend worden met behulp van vergelijking 3.4. Het horizontale potentiaalverschil wordt nu bepaald ten opzichte van de onderkant van de goed doorlatende laag. Wordt dit groter dan 40 cm, dan wordt vergelijking 3.6 toegepast. Het resultaat is in tabel 3b weergegeven.

In figuur 16 is voor een tweede, op 25 m afstand en 1,10 m diepte gedraineerd object van het drainageproefveld in het Hollanderbroek het verband tussen de afvoersnelheid en het potentiaalverschil in de goed doorlatende ondergrond weergegeven. De kromming is geringer dan bij het eerste object. Ook in dit geval kan het radiale potentiaalverschil worden verwaarloosd en het potentiaalverschil in de goed doorlatende ondergrond worden gelijkgesteld aan het horizontale potentiaalverschil. In tabel 4a zijn de waarde $K_3 D'_3$ en de doorlaatfactor van de goed doorlatende ondergrond weergegeven.

TABEL 4a. Berekening van de waarde $K_3 D'_3$ en de doorlaatfactor van de goed doorlatende ondergrond uit de diepe afvoersnelheid en het horizontale potentiaalverschil. Het betreft een tweede, op 25 m afstand en 1,10 m diepte gedraineerd, object van het drainageproefveld in het Hollanderbroek

a_3 in mm/dag	Δh_{hor} in cm	$K_3 D'_3 + \frac{1}{2} K_3 \Delta h_{hor} = \frac{a_3 l^2}{8 \Delta h_{hor}}$	$K_3 D'_3$ in m ² /dag	K_3 in m/dag
0,8	10	$K_3 D'_3 + 0,05 K_3 = 0,63$	0,42	4,2
2,2	20	$+ 0,10 = 0,84$		
3,6	30	$+ 0,15 = 0,93$		
5,1	40	$+ 0,20 = 0,99$		
6,7	50	$+ 0,25 = 1,04$		
			0,66	1,8
			0,75	1,2
			0,79	1,0

a_3 in mm/day	Δh_{hor} in cm.	$K_3 D'_3 + \frac{1}{2} K_3 \Delta h_{hor} = \frac{a_3 l^2}{8 \Delta h_{hor}}$	$K_3 D'_3$ in m ² /day	K_3 in m/day
-----------------	-------------------------	--	-----------------------------------	----------------

TABEL 4a. Calculation of the value $K_3 D'_3$ and the hydraulic conductivity of the high-permeable subsoil from the rate of deep discharge and the horizontal potential difference. The calculation concerns a second plot of the drainage experimental field in the 'Hollanderbroek', with a drain spacing of 25 m. and a depth of drainage of 1.10 m.

In dit geval komt de goed doorlatende laag zowel beneden als boven het drainniveau voor. Het rechte lijnige verloop in figuur 16 bij een potentiaalverschil groter dan 20 cm evenals de toename van de waarde $K_3 D'_3$ en de afname van de doorlaatfactor wijzen op een verandering in het profiel, waar de goed doorlatende laag naar boven toe overgaat in de slecht doorlatende laag. Uit een waarde voor $K_3 D'_3$ van 0,42 m²/dag en een doorlaatfactor van 4,2 m/dag volgt voor de dikte van de goed doorlatende laag beneden het drainniveau een waarde van 10 cm.

Stelt men de onderkant van de goed doorlatende laag op 10 cm beneden het drain-

TABEL 4b. Berekening van de doorlaatfactor van de goed doorlatende ondergrond met behulp van vergelijking 3.1 en 3.6 ($\Delta h_{hor} > 20$ cm) voor het in tabel 4a genoemde object. De onder- en bovenkant van de goed doorlatende ondergrond worden respectievelijk op 10 cm beneden en 20 cm boven het drainniveau aangenomen

a_s in mm/dag	Δh_{hor} in cm	K_s in m/dag
0,8	10	4,2
2,2	20	4,2
3,6	30	4,0
5,1	40	4,0
6,7	50	4,0
a_s in mm/day	Δh_{hor} in cm.	K_s in m/day

TABLE 4b. Calculation of the hydraulic conductivity of the high-permeable subsoil with equations 3.1 and 3.6 ($\Delta h_{hor} > 20$ cm.) for the plot of table 4a. The lower and upper part of the high-permeable subsoil have been taken at 10 cm. below and 20 cm. above the depth of drainage

niveau en de bovenkant op 20 cm boven het drainniveau wat overeenkomt met 90 cm -mv, dan kan de doorlaatfactor berekend worden met vergelijking 3.1 en, wanneer het horizontale potentiaalverschil groter wordt dan 20 cm, met vergelijking 3.6. In tabel 4b is het resultaat weergegeven.

Voor de beide objecten van het drainageproefveld in het Hollanderbroek kan uit de berekening worden afgeleid, dat er in het profiel op ongeveer 1 m diepte een goed doorlatende laag voorkomt ter dikte van 30 à 40 cm met een doorlaatfactor van 3 à 4 m/dag.

a3. *Samenvatting van de resultaten.* Op de verschillende drainageproefvelden, waarvan de oppervlakte der gedraineerde objecten ca. 2 ha bedraagt, met uitzondering van het drainageproefveld in het Hollanderbroek ter grootte van 10 ha, en op een aantal in ruilverkavelingsverband gedraineerde percelen in het Land van Maas en Waal werd de KD -waarde van de goed doorlatende ondergrond en de radiale weerstand volgens de grondwaterstands-debietmethode bepaald. Indien de goed doorlatende ondergrond voorkwam boven het drainniveau, zoals op het proefveld in het Hollanderbroek, werd de KD -waarde berekend uit de doorlaatfactor en de dikte van de goed doorlatende ondergrond, die in dit geval immers afzonderlijk worden bepaald. In tabel 5 zijn de resultaten samengevat, waarbij per proefveld of gebied zowel de spreiding als het gemiddelde is vermeld.

b. *Vergelijking van de resultaten van de grondwaterstands-debietmethode met de boorgatenmethode*

Bij een vergelijking van de grondwaterstands-debietmethode en de boorgatenmethode dient men er rekening mee te houden, dat bij de eerste methode de gemiddelde doorlaatfactor van een grote oppervlakte – de objecten waren ca. 0,5 ha groot – ineens wordt bepaald en dat bij de tweede methode per meting de doorlaatfactor over een

TABEL 5. De KD-waarde van de goed doorlatende ondergrond en de radiale weerstand, bepaald volgens de grondwaterstands-debietmethode op een aantal drainageproefvelden en gedraïneerde percelen

Proefveld of gedraïneerd perceel	Aantal objecten	KD in m ³ /dag		w in dag/m	
		spreiding	gemiddelde	spreiding	gemiddelde
Maaskant	4	0,5– 0,7	0,6	1,2–1,8	1,4
Tielerwaard-Dalem	4	0,7– 2,6	1,4	0,5–1,1	0,9
Tielerwaard-Hellouw	4	4,7–16,0	9,5	0,2–1,3	0,6
Hollanderbroek	19	0,1– 3,6	1,0	0,0–0,1	0
Tielerwaard-Asperen	3	0,2– 1,3	0,8	0,6–1,0	0,8
Tielerwaard-Heukelum	4	0,4– 1,2	0,8	1,9–5,2	3,4
Land van Maas en Waal	9	0,4– 1,5	1,0	0,0–3,2	1,4
Drainage experimental field or tile-drained parcel	Number of plots	variation	mean	variation	mean
		KD in m ³ /day		w in day/m	

TABLE 5. The KD-value of the high-permeable subsoil and the radial resistance, measured with the potential-discharge method on a number of drainage experimental fields and tile-drained parcels

kleine oppervlakte met een diameter van ongeveer 1 m wordt bepaald. In verband met de spreiding, dient men bij gebruik van de boorgatenmethode een zeker aantal waarnemingen te verrichten voor de vaststelling van de gemiddelde doorlaatfactor van een grotere oppervlakte. Hierbij doet zich de vraag voor, of de waarnemingen al dan niet een normale frequentieverdeling hebben. In het eerste geval kan het rekenkundig gemiddelde worden bepaald, in het tweede geval moet het gemiddelde op een andere manier worden berekend.

De doorlatendheidsbepalingen volgens de boorgatenmethode en eveneens volgens de piëzometer-methode en aan ringmonsters, zowel in de goed doorlatende ondergrond als in de slecht doorlatende laag, worden vaak gekenmerkt door het voorkomen van hoge afwijkende waarden (tabel 7, 8, 9, 10) en door een correlatie van de standaardafwijking met het rekenkundig gemiddelde. Dit wijst op een scheve frequentieverdeling. In figuur 17 is het verband tussen de standaardafwijking en de rekenkundig gemiddelde doorlaatfactor per perceel weergegeven voor de laag 0,70 tot 2,00 m op een aantal percelen in het Land van Maas en Waal. Hieruit blijkt, dat de standaardafwijking evenredig toeneemt met het rekenkundig gemiddelde. In een dergelijk geval verdient het de voorkeur het meetkundig gemiddelde ($\sqrt[n]{x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_n}$) te berekenen als representatieve waarde voor een reeks waarnemingen inplaats van het rekenkundig gemiddelde [$\frac{1}{n} \times (x_1 + x_2 + \dots + x_n)$] en de significantie van verschillen te berekenen na een logaritmische transformatie van de waarnemingen (21). Bij de verwerking van doorlaatfactoren, gemeten met de boorgatenmethode, de piëzometermethode en aan ringmonsters, is deze methode derhalve steeds gevolgd en het meetkundig gemiddelde toegepast. Het rekenkundig gemiddelde levert onder deze omstandigheden een hogere waarde op dan het meetkundig gemiddelde, waarvan tabel 6 en 10 een voorbeeld geven.

FIG. 17. Verband tussen de standaardafwijking (σ) in m/dag en de rekenkundig gemiddelde doorlaatfactor (\bar{K}) in m/dag per perceel. De doorlaatfactor werd bepaald met de boorgatenmethode in de laag 0,70 tot 2,00 m -mv op een aantal percelen in het Land van Maas en Waal

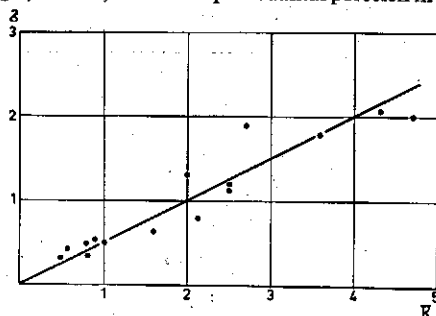


FIG. 17. Relation of the standard deviation (σ) in m/day with the arithmetic mean of the hydraulic conductivity (\bar{K}) in m/day of each parcel. The hydraulic conductivity has been measured with the auger hole method in the layer 0.70 to 2.00 m. below surface on a number of parcels in the 'Land van Maas en Waal'

In de volgende paragrafen zullen de KD -waarden, die volgens de grondwaterstands-debietmethode en de boorgatenmethode werden bepaald, per proefveld worden vergeleken, daar er in sommige gevallen wel, in andere gevallen geen redelijke overeenstemming tussen de beide methoden bestaat. Daarentegen stemt de radiale weerstand volgens beide methoden steeds redelijk overeen, zodat deze in één paragraaf zal worden besproken.

b1. *Drainageproefveld in de Maaskant.* In het bodemprofiel komt onder de slecht doorlatende laag vanaf een diepte van 0,60 m -mv een goed doorlatende laag voor, die ijzerconcreties bevat tot 1,20 m en humeuze resten tot 1,50 m. Hieronder volgt een lichtere ondergrond van zandige klei tot zand, waarin harde concreties voorkomen.

Volgens de boorgatenmethode bedraagt de gemiddelde doorlaatfactor voor de laag 0,60 tot 1,00 m -mv, 0,18 m/dag en voor de laag dieper dan 1,00 m, 0,41 m/dag. Het betreft het gemiddelde van de vier objecten, daar tussen de objecten, waarop het aantal waarnemingen 4 à 5 bedroeg, geen verschil kon worden vastgesteld.

Volgens de grondwaterstands-debietmethode varieert de KD -waarde voor de vier objecten van 0,5 tot 0,7 m²/dag en bedraagt gemiddeld 0,6 m²/dag. Dit stemt overeen met het resultaat van de boorgatenmethode, indien aangenomen wordt, dat de goed doorlatende ondergrond met een doorlaatfactor van 0,4 m/dag zich tot ongeveer 2,50 m -mv uitstrekt.

Het is in principe mogelijk bij stroming in een homogene grondlaag de dikte van de goed doorlatende ondergrond uit de radiale weerstand en de doorlaatfactor, gemeten volgens de boorgatenmethode, te berekenen door toepassing van vergelijking 2.9. Daar de te berekenen dikte onder het logaritmeteken voorkomt en de onnauwkeurigheid in de doorlaatfactor derhalve een grote invloed op het resultaat heeft, kan deze berekening slechts een orde van grootte opleveren. Daar in de goed doorlatende ondergrond van een komgrondprofiel doorgaans zones met verschillende doorlaatfactoren voorkomen, moet niet vergelijking 2.9, maar vergelijking 2.10 toegepast worden en is deze berekening niet mogelijk.

b2. *Drainageproefveld in de Tielerwaard bij Dalem.* Op dit proefveld treedt op een diepte van 0,55 m humeuze klei op, die beneden 0,75 m overgaat in venige klei, die weer afwisselend gevolgd wordt door kleiig veen en veen. Met de boorgatenmethode werden in de humeuze klei doorlaatfactoren van enige dm/dag gemeten en in de venige klei boven 1,00 m -mv doorlaatfactoren van enige m/dag, terwijl deze beneden 1 m, ca. 0,1 m/dag bedroegen. De venige laag beneden 1,00 m -mv kan derhalve als een tweede slecht doorlatende laag ten opzichte van de venige laag boven 1,00 m worden beschouwd.

Per object werden 15 tot 20 waarnemingen volgens de boorgatenmethode verricht. Uit de gemiddelde doorlaatfactor en de dikte van de goed doorlatende laag kan de *KD*-waarde worden berekend. Deze waarden zijn in tabel 6 gegeven, in vergelijking met het resultaat van de grondwaterstands-debietmethode, voor verschillende objecten.

TABEL 6. Vergelijking van de *KD*-waarde van de goed doorlatende ondergrond, bepaald volgens de grondwaterstands-debietmethode en de boorgatenmethode, waarbij in het tweede geval zowel de rekenkundig als de meetkundig gemiddelde doorlaatfactor wordt toegepast. Het betreft het drainageproefveld in de Tielerwaard bij Dalem

Object	KD-waarde in m ² /dag		
	grondwaterstands- debietmethode	boorgatenmethode	
		meetkundig gemiddelde	rekenkundig gemiddelde
1	0,7	0,6	1,1
2	0,7	0,6	1,4
3	1,5	2,0	2,8
4	2,6	2,4	2,6
		geometric mean	arithmetic mean
	potential-discharge method	auger hole method	
Plot	KD-value in m ² /day		

TABLE 6. Comparison of the *KD*-value of the high-permeable subsoil, measured with the potential-discharge method and with the auger hole method, applying in the second case the arithmetic as well as the geometric mean. This concerns the drainage experimental field in the 'Tielerwaard' near Dalem

De verschillen volgens de boorgatenmethode bleken tussen de objecten 1 en 2, evenals tussen 3 en 4, niet significant te zijn, wel echter de verschillen van de objecten 1 en 2 ten opzichte van 3 en 4. Het meetkundig gemiddelde leidt, in vergelijking met het rekenkundig gemiddelde, op drie objecten tot een aanmerkelijk lagere *KD*-waarde, die beter overeenstemt met het resultaat van de grondwaterstands-debietmethode. Op het vierde object, waar de spreiding bij de boorgatenmethode geringer was, geven beide gemiddelden een goede overeenstemming met de grondwaterstands-debietmethode.

b3. *Drainageproefveld in de Tielerwaard bij Hellouw.* Op vrijwel het gehele proefveld komt op een diepte van 0,90 à 1,00 m een zeer goed doorlatende laag van humeuze en venige klei voor. Met de boorgatenmethode werden in deze laag doorlaatfactoren van 25 tot 100 m/dag gemeten. In een derde van het aantal boringen, dat 15 à 20 per object bedroeg, vond de toestroming zo snel plaats, dat geen doorlaatfactor kon worden berekend. De gemiddelde doorlaatfactor zal op 50 à 100 m/dag gesteld kunnen worden. Bij een waargenomen dikte van deze laag van 10 à 20 cm leidt dit tot een *KD*-waarde van 5 tot 20 m²/dag. Dit is in overeenstemming met de *KD*-waarde volgens de grondwaterstands-debietmethode, die voor de vier objecten varieerde van 4,7 tot 16 m²/dag.

Plaatselijk ontbreekt de zeer goed doorlatende laag en worden doorlaatfactoren van circa 1 m/dag gemeten. In overeenstemming hiermee is het gedrag van de potentiaal in de goed doorlatende ondergrond, die op deze gedeelten aanmerkelijk hoger is tijdens afvoerperioden. Dit is in figuur 18 weergegeven.

FIG. 18. De vorm van de potentiaal, gemeten in de goed doorlatende ondergrond, bij een afvoer van 4,3 mm/dag, op het drainageproefveld in de Tielerwaard bij Hellouw. Met de boorgatenmethode werd ter hoogte van het drainniveau een doorlaatfactor van ca. 1 m/dag gemeten op het linkergedeelte met de hoge potentiaal en een doorlaatfactor van 25 tot 100 m/dag op het overige gedeelte met de lage potentiaal

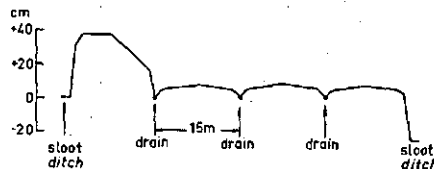


FIG. 18. The shape of the potential measured in the high-permeable subsoil, at a rate of discharge of 4.3 mm/day, on the drainage experimental field in the 'Tielerwaard' near Hellouw. At the depth of drainage, a hydraulic conductivity of appr. 1 m/day has been measured with the auger hole method on the left side having a high potential; a hydraulic conductivity of 25 to 100 m/day has been measured on the rest of the plot having a low potential

Naar aanleiding van deze figuur kan nog gewezen worden op het verschijnsel, dat de potentiaal in de goed doorlatende ondergrond in de nabijheid van de rechtersloot, waarvan de waterstand ongeveer 20 cm lager ligt dan het drainniveau, niet lager is dan in de nabijheid van de drains. Dit wijst er op, dat het profiel beneden de zeer goed doorlatende laag, die ter hoogte van het drainniveau ligt, verhoudingsgewijze slecht doorlatend is. Door de zeer hoge doorlaatfactoren van de goed doorlatende laag was het niet mogelijk met de boorgatenmethode betrouwbare waarden van de diepere laag te bepalen.

b4. *Drainageproefveld in het Hollanderbroek.* Onder de slecht doorlatende laag begint op een diepte van 0,70 m een beter doorlatende laag van humeuze klei met een enigszins lager slibgehalte (60 tot 70%), waarna op een diepte van 1,25 m venige klei volgt. Volgens de grondwaterstands-debietmethode varieert de *KD*-waarde van de 19 objecten tussen 0,1 en 3,6 m²/dag en bedraagt gemiddeld 1,0 m²/dag. Vrijwel steeds

werd ter hoogte van het drainniveau op een diepte van 1,10 à 1,20 m een tweede slecht doorlatende laag vastgesteld.

Met de boorgatenmethode werd de doorlaatfactor van de lagen 0,70 tot 1,00 m, 0,70 tot 1,20 m, enz. met een interval van 20 à 30 cm tot een diepte van 2,00 m bepaald. Een slecht doorlatende laag op een diepte van 1,10 à 1,20 m kon niet worden vastgesteld. De gemiddelde KD -waarde bedraagt $1,6 \text{ m}^2/\text{dag}$ voor de laag 0,70 tot 2,00 m. Het betreft het gemiddelde van de 19 objecten, daar tussen de objecten waarop het aantal waarnemingen 4 à 5 bedroeg, geen verschil kon worden vastgesteld.

Hieruit kan geconcludeerd worden dat de tweede slecht doorlatende laag, die volgens de grondwaterstands-debietmethode op een diepte van 1,10 à 1,20 m voorkomt, een zo geringe dikte heeft, dat deze bij metingen met een interval van 20 à 30 cm volgens de boorgatenmethode niet kan worden vastgesteld. In het profiel bleek op deze diepte, op de overgang van de humeuze naar de venige klei, een minder humeus laagje voor te komen ter dikte van 5 à 10 cm, dat een enigszins taaie en minder goed doorlatende indruk maakte dan de boven en onder gelegen lagen.

b5. *Drainageproefveld in de Tielerwaard bij Asperen.* Op een diepte van 0,65 m gaat de slecht doorlatende laag over in humeuze klei, waarna vanaf 0,75 m afwisselend venige klei, kleilig veen en veen volgen tot meer dan 2,00 m diepte.

Bij de grondwaterstands-debietmethode werd een rechte lijn verband tussen de afvoersnelheid en de potentiaal van de goed doorlatende ondergrond vastgesteld, waaruit een goed doorlatende laag volgt beneden het drainniveau, dat op 0,75 à 0,80 m -mv gelegen is. De KD -waarde bedraagt volgens deze methode op de drie objecten respectievelijk 0,2; 0,8 en $1,2 \text{ m}^2/\text{dag}$.

Met de boorgatenmethode werd de doorlaatfactor tot een diepte van 2,00 m bepaald met intervallen van 20 à 30 cm, waarbij geen tweede slecht doorlatende laag kon worden vastgesteld. De gemiddelde KD -waarde bedraagt $3,5 \text{ m}^2/\text{dag}$ tot een diepte van 2,00 m. Tussen de objecten, waarop ca. 25 waarnemingen per object werden gedaan, konden geen verschillen worden vastgesteld.

Om na te gaan, of het verschil in KD -waarde tussen beide methoden veroorzaakt wordt door een dunne slecht doorlatende laag, werden tot een diepte van 1,50 m 10 metingen per object verricht met een interval van 10 cm. In tabel 7a is het resultaat weergegeven voor het eerste object, waarvan de KD -waarde volgens de grondwaterstands-debietmethode $0,2 \text{ m}^2/\text{dag}$ bedroeg.

Uit de gemeten doorlaatfactoren werd de doorlaatfactor per laag van 10 cm berekend met behulp van de formule $K_2 D_2 = KD - K_1 D_1$ (b.v. $K_{90-100} \times 0,1 = K_{60-100} \times 0,4 - K_{60-90} \times 0,3$).

Daar dit een benaderingsformule is, kan een negatieve waarde voor K_2 berekend worden, indien K_2 veel kleiner is dan K_1 . In dit geval is in tabel 7b, waarin het resultaat van de berekening is weergegeven, een waarde van $0,01 \text{ m}^2/\text{dag}$ aangehouden.

Hoewel tabel 7b door toepassing van een benaderingsformule berekend is, blijkt hieruit toch, dat bij een interval van 10 cm geen tweede, aaneengesloten slecht doorlatende laag kan worden vastgesteld, maar dat afwisselend hogere en lagere doorlaatfactoren voorkomen. Beide andere objecten gaven een soortgelijk resultaat.

TABEL 7a. De doorlaatfactor in m/dag van de goed doorlatende ondergrond, gemeten volgens de boorgatenmethode op een object van het drainageproefveld in de Tielerwaard bij Asperen

Laag in m -mv	Gemeten doorlaatfactor in m/dag										Meetkundig gemiddelde
0,60-0,90	0,34	0,16	0,19	0,05	3,50	0,11	0,23	0,35	1,00	0,07	0,25
-1,00	0,33	0,30	0,24	1,20	3,80	0,17	0,24	0,30	0,87	0,12	0,41
-1,10	0,43	0,39	0,22	0,15	2,60	0,59	0,30	0,26	0,68	0,18	0,39
-1,20	0,37	0,43	0,20	0,24	3,30	0,63	0,60	0,61	0,55	0,42	0,52
-1,30	0,77	0,70	0,26	0,48	2,70	0,70	0,72	0,66	0,57	0,33	0,64
-1,40	0,74	0,83	0,71	0,72	2,40	1,00	0,95	0,85	1,00	0,81	0,93
-1,50	0,56	-	1,00	0,43	2,20	1,10	1,20	1,40	1,50	1,20	1,06
<i>Layer in m. below surface</i>	<i>Measured hydraulic conductivity in m/day</i>										<i>Geometric mean</i>

TABLE 7a. The hydraulic conductivity in m/day of the high-permeable subsoil, measured with the auger hole method on a plot of the drainage experimental field in the 'Tielerwaard' near Asperen

TABEL 7b. De doorlaatfactor in m/dag per laag van 10 cm, berekend uit de gemeten doorlaatfactoren van tabel 7a

Laag in m -mv	Gemeten doorlaatfactor in m/dag										Meetkundig gemiddelde
0,60-0,90	0,34	0,16	0,19	0,05	3,50	0,11	0,23	0,35	1,00	0,07	0,25
0,90-1,00	0,30	0,72	0,39	4,60	4,70	0,35	0,27	0,15	0,48	0,27	0,57
1,00-1,10	0,83	0,75	0,14	0,01	0,01	2,30	0,54	0,10	0,01	0,42	0,15
1,10-1,20	0,07	0,63	0,10	0,69	6,80	0,83	2,10	2,40	0,01	1,60	0,52
1,20-1,30	3,20	2,30	0,62	1,90	0,01	1,10	1,40	0,96	0,69	0,01	0,49
1,30-1,40	0,53	1,70	3,90	2,40	0,30	3,10	2,60	2,20	4,00	4,20	1,94
1,40-1,50	0,01	-	3,30	0,01	0,60	1,90	3,20	5,80	5,50	4,30	0,82
<i>Layer in m. below surface</i>	<i>Calculated hydraulic conductivity in m/day</i>										<i>Geometric mean</i>

TABLE 7b. The hydraulic conductivity in m/day per layer of 10 cm., calculated from the data of table 7a

Daar de meer of minder venige lagen een horizontale gelaagdheid vertonen, is een vorm van anisotropie mogelijk, waarbij de doorlaatfactor in horizontale richting groter is dan in verticale richting. In dat geval zal bij de boorgatenmethode, waarbij de stroming in belangrijke mate in horizontale richting plaats vindt, een hogere doorlaatfactor bepaald worden dan in werkelijkheid bij de grondwaterstroming optreedt en volgens de grondwaterstands-debietmethode berekend wordt.

Om het verschil in horizontale en verticale doorlaatfactor te onderzoeken, werden met de piëzometermethode weer 10 metingen per object verricht met een interval van

TABEL 8a. De horizontale doorlaatfactor in m/dag per laag van 10 cm, gemeten volgens de piëzometermethode op het in tabel 7a genoemde object

Laag in m -mv	Horizontale doorlaatfactor in m/dag										Meetkundig gemiddelde
0,80-0,90	0,35	0,07	0,14	0,02	0,10	0,03	0,14	0,13	0,13	0,21	0,10
0,90-1,00	0,75	0,06	1,20	0,10	0,62	0,19	1,60	1,40	0,40	0,40	0,43
1,00-1,10	0,85	0,26	0,05	0,03	0,15	0,60	0,80	0,29	0,88	0,43	0,28
1,10-1,20	0,31	0,80	0,74	0,20	0,05	0,31	0,22	0,36	0,01	0,30	0,21
1,20-1,30	0,55	1,20	0,48	0,20	1,60	0,32	1,30	0,18	0,60	0,46	0,54
1,30-1,40	2,00	0,10	0,61	0,18	0,23	0,14	1,50	0,48	0,75	0,70	0,44
1,40-1,50	2,90	3,10	1,00	0,05	0,03	1,30	0,87	2,40	1,00	0,23	0,60
<i>Layer in m. below surface</i>	<i>Horizontal hydraulic conductivity in m/day</i>										<i>Geometric mean</i>

TABEL 8a. The horizontal hydraulic conductivity in m/day per layer of 10 cm., measured with the piezometer method on the plot of table 7a

TABEL 8b. De verticale doorlaatfactor in m/dag op diepten, die een interval van 10 cm verschillen, gemeten volgens de piëzometermethode op het in tabel 7a genoemde object

Diepte in m -mv	Verticale doorlaatfactor in m/dag										Meetkundig gemiddelde
0,80	0,10	0,09	0,23	0,08	0,05	1,90	4,00	0,01	4,10	0,06	0,20
0,90	6,40	0,50	1,40	0,01	0,22	0,04	0,27	1,50	0,76	2,70	0,45
1,00	5,00	0,01	0,40	0,34	0,08	2,10	0,01	0,11	4,90	2,50	0,33
1,10	0,56	0,05	0,60	0,01	0,05	4,90	0,05	0,09	0,06	3,60	0,18
1,20	3,90	0,70	0,81	0,01	0,20	0,20	0,27	0,11	4,30	0,01	0,25
1,30	0,26	0,13	0,02	0,30	1,70	0,05	5,80	0,05	0,52	0,63	0,21
1,40	13,00	0,42	3,40	0,03	0,03	0,02	3,90	4,30	5,40	0,01	0,45
<i>Depth in m. below surface</i>	<i>Vertical hydraulic conductivity in m/day</i>										<i>Geometric mean</i>

TABEL 8b. The vertical hydraulic conductivity in m/day at different depths, measured with the piezometer method on the plot of table 7a

10 cm tot een diepte van 1,50 m. Voor de bepaling van de horizontale doorlaatfactor werd het boorgat tot 10 cm boven de onderkant afgesloten met een buis en voor de bepaling van de verticale doorlaatfactor tot de onderkant. In het eerste geval vindt de stroming overwegend in horizontale richting plaats, in het tweede geval overwegend in verticale richting. Door FREVERT en KIRKHAM (8) en REEVE en KIRKHAM (23) wordt deze methode ter bepaling van de horizontale en verticale doorlaatfactor beschreven. Het resultaat van de metingen is voor het eerste object weergegeven in tabel 8a en 8b.

Uit tabel 8a blijkt, dat met de piëzometermethode voor de horizontale doorlaatfactor een soortgelijk resultaat verkregen wordt als met de boorgatenmethode, namelijk

een afwisseling van hoge en lage doorlaatfactoren. De grotere spreiding in het geval van de boorgatenmethode (tabel 7b) kan zijn verklaring vinden in de toepassing van de benaderingsformule bij de berekening.

Ook de verticale doorlaatfactor in tabel 8b geeft eenzelfde beeld te zien, waarbij de spreiding echter groter is dan bij de horizontale doorlaatfactor volgens de piëzometermethode. De oorzaak van de grotere spreiding kan gelegen zijn in het feit, dat het volume grond waarin de stroming plaats vindt bij de bepaling van de verticale doorlaatfactor, veel kleiner is dan het volume grond bij de bepaling van de horizontale doorlaatfactor. In beide gevallen was de diameter van de buis gelijk, namelijk 5 cm.

Tussen de horizontale en verticale doorlaatfactor, die volgens deze methode werden bepaald, kon geen significant verschil worden vastgesteld. Evenmin was dit het geval bij de bepaling van de doorlaatfactor aan ringmonsters, die in horizontale en verticale richting gestoken waren.

Voor de laag 0,80 tot 1,50 m kan echter uit de bepalingen van de horizontale doorlaatfactor volgens de piëzometermethode een gemiddelde doorlaatfactor berekend worden van 0,32 m/dag. Deze waarde vertoont een significant verschil met de aanmerkelijk hogere waarde van 1,06 m/dag, die bij toepassing van de boorgatenmethode over de laag 0,60 tot 1,50 m gemeten wordt. Het is mogelijk, dat de vorm van anisotropie, waarbij hoge en lage doorlaatfactoren elkaar afwisselen, leidt tot een veel kleinere KD -waarde dan met de boorgatenmethode wordt bepaald.

De metingen op de beide andere objecten leverden soortgelijke resultaten op.

Voor het verschil in KD -waarde tussen de grondwaterstands-debietmethode en de boorgatenmethode zou op grond van deze metingen de verklaring gezocht kunnen worden of in de aanwezigheid van dunne slecht doorlatende lagen in de venige ondergrond van minder dan 10 cm dikte, of in het afwisselend voorkomen van hoge en lage doorlaatfactoren, waardoor de KD -waarde aanmerkelijk kleiner zou worden dan op grond van de boorgatenmethode wordt aangenomen.

b6. *Drainageproefveld in de Tielerwaard bij Heukelum.* Beneden een diepte van 0,65 m komen afwisselend meer of minder venige lagen voor. Volgens de grondwaterstands-debietmethode varieert de KD -waarde op 4 objecten van 0,4 tot 1,2 m²/dag en bedraagt gemiddeld 0,8 m²/dag. Bij de bepaling met de boorgatenmethode tot een diepte van 2,00 m kon geen tweede slecht doorlatende laag worden vastgesteld en evenmin verschillen tussen de objecten, waarbij het aantal waarnemingen 15 à 20 per object bedroeg. De gemiddelde KD -waarde tot een diepte van 2,00 m -mv bedraagt 2,1 m²/dag en is veel groter dan volgens de grondwaterstands-debietmethode. Op dit proefveld geeft de vergelijking tussen beide methoden derhalve een zelfde resultaat als op het proefveld bij Asperen.

b7. *Gedraineerde percelen in het Land van Maas en Waal.* In het algemeen gaat de slecht doorlatende laag hier op een diepte van 0,70 m over in een goed doorlatende laag van klei met ijzerconcreties of humeuze klei en wisselen op grotere diepte meer of minder venige lagen elkaar af. Op één perceel kon een tweede slecht doorlatende laag, die volgens de grondwaterstands-debietmethode op het drainniveau op een diepte van

1,10 m aanwezig was, worden vastgesteld als een grijze kleilaag zonder ijzerconcreties en humeuze bijmenging ter dikte van 20 à 40 cm, waarvan de doorlaatfactor volgens de boorgatenmethode 0,2 à 0,3 m/dag bedroeg. Daarboven bevond zich een concretierijke kleilaag met een doorlaatfactor van enige m/dag. Op de overige 8 percelen kon tot een diepte van 2,00 m geen tweede slecht doorlatende laag vastgesteld worden en de *KD*-waarde was, evenals op de beide vorige proefvelden, volgens de grondwaterstands-debietmethode steeds lager dan volgens de boorgatenmethode.

b8. *De radiale weerstand.* Voor de radiale weerstand werden volgens de grondwaterstands-debietmethode waarden van 0 à 0,2 dag/m gemeten op de drainageproefvelden in het Hollanderbroek en in de Tielerwaard bij Hellouw en op een gedraineerd perceel in het Land van Maas en Waal. Deze lage waarden kunnen eveneens met formule 2.9 berekend worden voor die gevallen, waarin de doorlaatfactor van de laag waarin de drains gelegen zijn, één of meer m/dag bedraagt en de dikte van deze laag gering is.

In de overige gevallen werden met de grondwaterstands-debietmethode hogere waarden voor de radiale weerstand bepaald. Bij metingen volgens de boorgatenmethode met opeenvolgende intervallen van 20 à 30 cm werd vastgesteld dat de doorlaatfactor van de bovenste zone van de goed doorlatende laag, waarin de drains in het algemeen gelegen zijn, 0,2 à 0,3 m/dag bedraagt. Onder toepassing van een doorlaatfactor in deze orde van grootte kunnen met formule 2.10 soortgelijke waarden als met de grondwaterstands-debietmethode bepaald werden, voor de radiale weerstand berekend worden.

b9. *Samenvatting.* Uit de vergelijking tussen de *KD*-waarden, die bepaald werden volgens de grondwaterstands-debietmethode en de boorgatenmethode, blijkt, dat beide methoden een goede overeenstemming geven op het drainageproefveld in de Maaskant, op een gedraineerd perceel in het Land van Maas en Waal en op de drainageproefvelden in de Tielerwaard bij Dalem en Hellouw. In het eerste geval betreft het een bodemprofiel waarvan de goed doorlatende ondergrond bestaat uit klei, met ijzerconcreties en humeuze resten, die geleidelijk lichter wordt en waarin tot een diepte van tenminste 2,00 m geen tweede slecht doorlatende laag voorkomt. In het tweede geval bestaat de goed doorlatende laag uit concretierijke klei, waaronder een tweede slecht doorlatende laag van grijze klei zonder concreties en humeuze bijmenging voorkomt. In het derde en vierde geval bestaat de goed doorlatende laag uit humeuze en venige klei en deze heeft een betrekkelijk geringe dikte van 20 à 40 cm, waaronder meer of minder venige lagen met een geringe doorlaatfactor voorkomen. Daar de doorlaatfactoren, die bepaald worden met de boorgatenmethode, vaak hoge afwijkende waarden vertonen, verdient in deze gevallen de toepassing van het meetkundig gemiddelde de voorkeur boven het rekenkundig gemiddelde.

Daarentegen blijkt geen overeenstemming te bestaan tussen de resultaten van beide methoden op de drainageproefvelden in het Hollanderbroek en in de Tielerwaard bij Asperen en Heukelum en op een aantal gedraineerde percelen in het Land van Maas en Waal. De *KD*-waarde, die op grond van de metingen met de boorgatenmethode

berekend wordt, is steeds groter dan die volgens de grondwaterstands-debietmethode. De goed doorlatende ondergrond bestaat hier uit meer of minder venige lagen, waarin noch visueel, noch bij metingen met intervallen van 10 tot 30 cm volgens de boorgatenmethode, een tweede slecht doorlatende laag kon worden vastgesteld. Alleen op het drainageproefveld in het Hollanderbroek werd op een diepte van 1,10 à 1,20 m een 5 à 10 cm dikke laag gevonden, die visueel een minder goed doorlatende indruk maakte.

In verband met de horizontale gelaagdheid van de venige lagen zou de doorlaatfactor in horizontale richting groter kunnen zijn dan in verticale richting, waardoor bij toepassing van de boorgatenmethode een te gunstig beeld van de doorlaatfactor wordt verkregen. Een dergelijke vorm van anisotropie kon echter niet worden vastgesteld, noch met de piëzometermethode, noch bij metingen aan ringmonsters. Wel blijkt bij metingen in opeenvolgende lagen van 10 cm, dat hoge en lage doorlaatfactoren elkaar voortdurend afwisselen. De verklaring voor het verschil tussen beide methoden zou gelegen kunnen zijn, óf in de aanwezigheid van dunne, slecht doorlatende lagen in de venige ondergrond van minder dan 10 cm dikte, óf in een vorm van anisotropie, waarbij door het afwisselend voorkomen van hoge en lage doorlaatfactoren de KD -waarde kleiner zou worden dan op grond van de boorgatenmethode wordt bepaald. Welke de oorzaak van dit verschil ook is, men dient er rekening mee te houden, dat de boorgatenmethode tot te hoge uitkomsten kan leiden op profielen met een meer of minder venige ondergrond, waarin geen tweede slecht doorlatende laag onder de goed doorlatende laag kan worden vastgesteld.

De waarden voor de radiale weerstand, die bepaald worden volgens de grondwaterstands-debietmethode, kunnen ook berekend worden met de formules 2.9 en 2.10 onder toepassing van de doorlaatfactor, die gemeten wordt met de boorgatenmethode.

2. DE DOORLAATFACTOR VAN DE SLECHT DOORLATENDE LAAG

a. *Bepaling door middel van de boorgatenmethode*

Daar de slecht doorlatende laag in het algemeen gelegen is tussen 0,20 en 0,70 m -mv, dient voor de toepassing van de boorgatenmethode de grondwaterstand 0,30 à 0,40 m -mv te bedragen. Deze methode kan derhalve alleen worden gebruikt in perioden, waarin de grondwaterstand hoog is tengevolge van regenval of infiltratie.

In tabel 9 is de frequentieverdeling weergegeven voor 30 en 91 doorlaatfactoren, die op de drainageproefvelden in de Tielerwaard respectievelijk bij Asperen en Hellouw gemeten werden in de slecht doorlatende laag.

Uit tabel 9 blijkt dat ook de doorlaatfactoren, gemeten met de boorgatenmethode in de slecht doorlatende laag, geen normale frequentieverdeling vertonen. De meetkundige gemiddelden bedragen voor de drainageproefvelden bij Asperen en bij Hellouw respectievelijk 0,011 en 0,026 m/dag. Bij de bepaling door middel van infiltratie met sleuven en infiltrometers (paragraaf III, 2d) werd echter op het drainageproefveld bij Asperen een doorlaatfactor van ongeveer 0,05 m/dag bepaald en op het drainageproefveld bij Hellouw een doorlaatfactor van 0,2 m/dag.

Bij toepassing van de boorgatenmethode kan een te geringe doorlaatfactor in de slecht doorlatende laag gemeten worden door de volgende oorzaken:

TABEL 9. Frequentieverdeling van de doorlaatfactor van de slecht doorlatende laag, gemeten volgens de boorgatenmethode op de drainageproefvelden in de Tielerwaard bij Asperen en Hellouw

Aantal waarnemingen		Doorlaatfactor in m/dag
Asperen	Hellouw	
19	30	<0,01
6	26	0,01–0,049
5	13	0,05–0,099
	11	0,10–0,149
	3	0,15–0,199
	5	0,20–0,499
	3	0,50–1,00
30	91	
Asperen	Hellouw	Hydraulic conductivity in m/day
Number of observations		

TABLE 9. Frequency distribution of the hydraulic conductivity of the low-permeable layer, measured with the auger hole method on the drainage experimental fields in the 'Tielerwaard' near Asperen and Hellouw

1. In de slecht doorlatende laag kan de doorlaatfactor in verticale richting tengevolge van wortelgangen en scheuren groter zijn dan in horizontale richting, terwijl bij de boorgatenmethode de stroming overwegend in horizontale richting plaats vindt.
2. Door het dichtsmen van de wand van het boorgat. De invloed van het dichtsmen van de poriën op de doorlaatfactor zal bij de volgende methode worden toegelicht.

b. *Bepaling door middel van ringmonsters*

Bij de bepaling van de doorlaatfactor aan ringmonsters is men niet afhankelijk van de grondwaterstand. De bepaling in het laboratorium werd uitgevoerd volgens de door ERNST en WIT beschreven methode (5).

Voor deze bepaling werden op het drainageproefveld in de Tielerwaard bij Asperen ringmonsters van 100 cc genomen van de slecht doorlatende laag in horizontale en verticale richting. De monsternamen vond plaats in een periode, waarin het vochtgehalte van de grond overeenkwam met het evenwichtsvochtgehalte. Bij de ene helft van de monsters werden de boven- en onderkant van de ring glad afgesneden, bij de andere helft werden door het zorgvuldig verwijderen van de structuur-aggregaten aan de boven- en onderkant van de ring brokkelige breukvlakken verkregen. Het resultaat van de metingen is in tabel 10 samengevat.

Uit tabel 10 blijkt de invloed van het dichtsmen van de grotere poriën op de doorlaatfactor. In het geval van gladde snijvlakken zijn de waarnemingen, op één uitzondering na, kleiner dan 0,01 m/dag en verschilt het rekenkundig en meetkundig gemiddelde betrekkelijk weinig, daar de spreiding veel geringer is dan bij brokkelige breukvlakken. In het laatste geval kan de aanwezigheid van wortelgangen en scheuren in de

TABEL 10. De doorlaatfactor in m/dag, bepaald aan ringmonsters van 100 cc, waarin de boven- en onderkant glad waren afgesneden of brokkelig waren door het verwijderen van structuur-aggregaten. De monsters zijn in horizontale en verticale richting genomen in de slecht doorlatende laag op het drainage proefveld in de Tielerwaard bij Asperen

	Glad snijvlak		Brokkelig breukvlak	
	horizontaal	verticaal	horizontaal	verticaal
Doorlaatfactor in mm/dag <i>Hydraulic conductivity in mm/day</i>	0,004	0,005	0,002	0,001
	0,009	0,009	0,18	0,050
	0,003	0,004	0,002	0,010
	0,001	0,002	1,60	0,014
	0,003	0,004	0,003	0,027
	0,003	0,003	0,010	22,5
	0,020	0,005	0,001	0,014
	0,003	0,007	0,013	0,63
Rekenkundig gemiddelde <i>Arithmetic mean</i>	0,006	0,005	0,23	2,91
Meetkundig gemiddelde <i>Geometric mean</i>	0,004	0,004	0,012	0,05
	<i>horizontal</i>	<i>vertical</i>	<i>horizontal</i>	<i>vertical</i>
	<i>Cut smoothly</i>		<i>Crumbly</i>	

TABLE 10. The hydraulic conductivity in m/day, measured in undisturbed samples of 100 cc., of which the upper and lower part have been cut smoothly or were made crumbly by taking out soil aggregates. The samples have been taken in horizontal and vertical direction from the low-permeable layer on the drainage experimental field in the 'Tielerwaard' near Asperen

kleine monsters van 100 cc zeer hoge doorlaatfactoren veroorzaken, waardoor er een zeer groot verschil tussen het rekenkundig en meetkundig gemiddelde ontstaat. In verband met deze spreiding is het verschil tussen de horizontale en verticale doorlaatfactor in tabel 10 niet significant en bedraagt de rekenkundig en meetkundig gemiddelde doorlaatfactor van de 16 ringen met een brokkelig breukvlak respectievelijk 1,57 en 0,025 m/dag.

Bij de bepaling van de doorlaatfactor aan ringmonsters van zware, humusarme klei- en verdient derhalve het zorgvuldig verwijderen van de structuur-aggregaten aan de boven- en onderzijde van de ring de voorkeur boven het glad afsnijden, ten einde de natuurlijke structuur zo goed mogelijk te handhaven. Bij de bepaling aan monsters van de humeuze zodelaag en de humeuze ondergrond werd geen onderscheid tussen de verschillende behandelingen vastgesteld.

c. *Bepaling door middel van het potentiaalverschil tussen buizen van verschillende lengte bij grondwaterstroming in de slecht doorlatende laag*

In paragraaf II,1b werd reeds opgemerkt, dat het potentiaalverschil voor de verticale grondwaterstroming in de slecht doorlatende laag in principe gemeten kan worden als het verschil in waterstand tussen twee buizen, waarvan de filters zich respectievelijk bevinden in de slecht doorlatende laag ter plaatse van de grondwaterstand en in de

goed doorlatende ondergrond. Wordt tevens de afvoer bepaald en is de dikte van de slecht doorlatende laag waarover de grondwaterstroming plaats vindt bekend, dan kan met formule 2.6 de doorlaatfactor van de slecht doorlatende laag berekend worden. Evenals bij de grondwaterstands-debietmethode dient men geen gebruik te maken van waarnemingen die tijdens en direct na het einde van de neerslag verkregen zijn, dit ter vermijding van een te hoge afvoersnelheid door de invloed van de niet-stationaire stroming of van de ondiepe afvoer.

De waterstandsbuizen in de slecht doorlatende laag, die alleen midden tussen de drains geplaatst werden, blijken echter met een zekere vertraging te reageren. Hierdoor daalt tijdens afvoerperioden de waterstand, die in de slecht doorlatende laag gemeten wordt, langzamer na het einde van de neerslag, dan de waterstand die in de goed doorlatende ondergrond wordt gemeten. Daar nu het potentiaalverschil groter wordt bij een geringere afvoersnelheid, worden steeds kleinere doorlaatfactoren berekend. Dit kan worden toegelicht met tabel 11, die betrekking heeft op metingen op het drainageproefveld in het Hollanderbroek in februari 1957.

TABEL 11. De doorlaatfactor in m/dag van de slecht doorlatende laag op het drainageproefveld in het Hollanderbroek, berekend met de vergelijking 2.6 voor een afvoerperiode in februari 1957. Door de vertraging van de waterstandsbuis in de slecht doorlatende laag worden op 15 en 19 februari lagere doorlaatfactoren berekend

Object	12 februari	15 februari	19 februari
5	0,012	0,006	0,003
6	0,009	0,007	0,005
15	0,015	0,011	0,005
17	0,018	0,010	0,007
Plot	February 12	February 15	February 19

TABLE 11. The hydraulic conductivity in m/day of the low-permeable layer on the drainage experimental field in the 'Hollanderbroek', calculated with equation 2.6 for a discharge period in February 1957. As a result of the delay in the piezometer placed in the low-permeable layer, lower values have been calculated for February 15 and 19

Ter nadere toelichting op tabel 11 kan nog gezegd worden dat in het geval van object 5, de waterstand in de goed doorlatende ondergrond van 12 tot 15 februari 12 cm daalde, de waterstand in de slecht doorlatende laag echter 3 cm. De afvoersnelheid verminderde van 6,5 tot 4,1 mm/dag.

In dit geval werden buizen toegepast met een diameter van 2,5 cm, geplaatst in een boorgat met een diameter van 8 cm en met grofzand omstort ter lengte van het filter van 25 cm. Dit type werd later vergeleken met een buis waarvan de diameter 1,5 cm en de filterlengte 5 cm bedroeg en die geplaatst werd in een boorgat met eveneens een diameter van 1,5 cm. Door ERNST (3) werd voor een buis van het eerste type, geplaatst in een laag met een doorlaatfactor van ca. 0,05 m/dag, berekend dat een evenwichts-verstoring zich na een periode van 3 uur voor 90% zou hebben hersteld en dat eenzelfde periode zou gelden voor een buis van het tweede type, indien deze geplaatst is in een laag met een doorlaatfactor van 0,005 m/dag. Hoewel het laatstgenoemde type

in verband met de kleinere diameter een geringere vertraging zou moeten hebben, bleek het tegenovergestelde het geval te zijn. De vertraging was zo groot dat in deze buizen, die op verschillende diepten in de slecht doorlatende laag beneden de grondwaterstand waren geplaatst op een perceel met een hoge grondwaterstand, na een week slechts enige centimeters water waren binnen gedrongen. Werden deze buizen in boorgaten van 8 cm diameter geplaatst, dan reageerden zij vrijwel gelijk als de buizen van het eerste type.

De grote vertraging in de waterstandsbuizen kan niet worden verklaard uit de doorlaatfactor van de slecht doorlatende laag, die in deze gevallen volgens andere bepalingen 0,025 à 0,05 m/dag bedroeg, maar moet worden toegeschreven aan een zeer lage doorlaatfactor door het dichtsmeren van de wand van het boorgat. Bovendien kan tijdens afvoerperioden de waterstand verhoogd worden tengevolge van de toestroming door de zodelaag of over het maaiveld, hetgeen in het bijzonder tijdens dooi-perioden en op percelen met een geringe doorlaatfactor in de zodelaag werd geconstateerd. Hierdoor werkt de waterstandsbuis in de slecht doorlatende laag tijdelijk als een reservoir, waarin het evenwicht zich slechts langzaam herstelt.

De waarnemingen van waterstandsbuizen in de slecht doorlatende laag zijn door deze oorzaken niet bruikbaar voor de bepaling van het verticale potentiaalverschil en de berekening van de doorlaatfactor. Vindt grondwaterstroming in de slecht doorlatende laag plaats, dan bestaat er theoretisch een potentiaalverschil tussen de grondwaterstand en de potentiaal in de goed doorlatende ondergrond, maar praktisch is men niet in staat dit verschil te meten met behulp van waterstandsbuizen. Men kan het verticale potentiaalverschil berekenen uit de afvoersnelheid, de doorstroomde dikte van de slecht doorlatende laag en de volgens een andere methode bepaalde doorlaatfactor, en uit dit potentiaalverschil en de potentiaal van de goed doorlatende ondergrond de grondwaterstand bepalen.

d. Bepaling door middel van infiltratie met sleuven of infiltrometers in de zodelaag

Door middel van infiltratie met een sleuf in de zodelaag kan de doorlaatfactor zowel van de zodelaag als van de slecht doorlatende laag bepaald worden. Deze methode werd door ERNST (4) toegepast bij het onderzoek van pikkei in Noord-Holland en kan toegelicht worden aan de hand van de bepaling op het drainageproefveld in de Tielerwaard bij Asperen, weergegeven in figuur 19 a, b, c en d.

In een sleuf met een lengte van 5 m, een breedte van 0,25 m en een diepte van 0,15 m wordt het peil met behulp van een reservoir gedurende een zekere periode op een constant niveau gehandhaafd. Voor de bepaling van de waterstand in de zodelaag worden buizen toegepast die tot 0,20 m -mv reiken en op verschillende afstanden uit de sleuf geplaatst zijn. Uit het waterverbruik, waarop een correctie voor verdamping en regenval wordt aangebracht, en de oppervlakte waarover de stroming zich uitstrekt in de zodelaag, kan de afvoersnelheid in de slecht doorlatende laag berekend worden. Voor de doorlaatfactor van de zodelaag geldt (4):

$$K_1 = a_2 \frac{l^2}{\Delta h_1^2} \quad (3.11)$$

Tevens wordt de potentiaal in de goed doorlatende ondergrond bepaald, waardoor het verticale potentiaalverschil te berekenen is, en de dikte van de slecht doorlatende laag. Wanneer de verticale weerstand van de zodelaag en de goed doorlatende ondergrond verwaarloosd kunnen worden, is het verticale potentiaalverschil gelijk aan het potentiaalverschil in de slecht doorlatende laag en geldt voor de doorlaat-factor van de slecht doorlatende laag na het intreden van een stationaire toestand:

$$K_2 = a_2 \frac{D_2}{\Delta h_2} \quad (3.12)$$

Deze methode heeft het voordeel, dat de doorlaatifactor over een veel grotere oppervlakte wordt bepaald dan met de andere methoden, zodat de invloed van scheuren en wortelgangen over deze oppervlakte wordt verdeeld en dat geen verstoring in de slecht doorlatende laag plaats vindt. De moeilijkheid is echter gelegen in een eventuele geleidelijke afname van de doorlaatifactor met de diepte, hetgeen door indroging en scheurvorming in de zomer het geval kan zijn. Wanneer de dikte van de goed doorlatende zodelaag 20 cm bedraagt, wordt ook de doorlaatifactor van de slecht doorlatende laag op 20 cm -mv bepaald, terwijl de doorlaatifactor op grotere diepte kleiner kan zijn. In dat geval zal beneden 20 cm niet alleen verticale stroming, maar ook zijdelingse stroming plaats vinden. Om het stromingsveld zo goed mogelijk te bepalen werden derhalve ook buizen in de slecht doorlatende laag geplaatst. Hoewel deze buizen een grote vertraging hebben, kan bij langdurige metingen van één of meer weken het al dan niet optreden van water in de buizen een aanwijzing zijn voor de grens van het stromingsveld in horizontale richting, mits in deze periode geen neerslag als storende factor optreedt.

Bij de metingen bleek namelijk, dat niet met een periode van enige uren kan worden volstaan, maar dat deze tenminste gedurende enige dagen moeten worden voortgezet. Daar bij het begin van de meting de grond in het algemeen niet verzadigd is en de diepe potentiaal zich nog niet op de wateraanvoer heeft ingesteld, kan het waterverbruik aanvankelijk zeer groot zijn en sterk afnemen gedurende de eerste uren, terwijl de diepe potentiaal stijgt. Daarna neemt het waterverbruik langzaam verder af, of blijft vrijwel constant. Het eerste geval komt in de zomer voor en kan worden toegeschreven aan een geleidelijke afname van de doorlaatifactor door dichtzwellen van scheuren. De meting moet dan één of meer weken worden voortgezet, voordat een constant waterverbruik bereikt is. Ook in het tweede geval, dat in de winter optreedt, verdient het aanbeveling de meting gedurende enige dagen tot een week voort te zetten, daar er van dag tot dag verschillen in het waterverbruik voorkomen, die zowel door afleesfouten als door de activiteit van wormen e.d. veroorzaakt kunnen worden.

Op het drainageproefveld in de Tielerwaard bij Asperen daalde in de week 16 tot 23 juni 1958 het waterverbruik gedurende de eerste dag van 1735 liter/uur tot 18 liter/uur en steeg de diepe potentiaal 30 cm. Vervolgens nam het waterverbruik gedurende een week langzaam af tot 8,9 liter/uur, terwijl de diepe potentiaal constant bleef (figuur 19a). Daar de lengte en de breedte van de strook waarover de stroming in de zodelaag zich uitstrekt, respectievelijk op 5,45 m en 0,7 m gesteld konden worden volgens de waterstandsmetingen in de zodelaag en de oppervlakte derhalve 3,8 m² bedroeg, werd voor de afvoersnelheid in de slecht doorlatende laag na één dag 0,113 m/dag en na één week 0,055 m/dag berekend. De dikte van de slecht doorlatende laag was 45 cm en het verticale potentiaal-

FIG. 19a. Bepaling van de doorlaatfactor van de zode laag en de slecht doorlatende laag door infiltratie met een sleuf, onder toepassing van de vergelijkingen 3.11 en 3.12, op het drainageproefveld in de Tielerwaard bij Asperen. Van 16 tot 23 juni 1958 bedroeg het sleufpeil 0,10 m -mv en door dichtzwellen van scheuren daalde K_1 van 0,55 tot 0,27 m/dag en K_2 van 0,127 tot 0,062 m/dag. 1 = zodelaag; 2 = slecht doorlatende laag; 3 = goed doorlatende laag

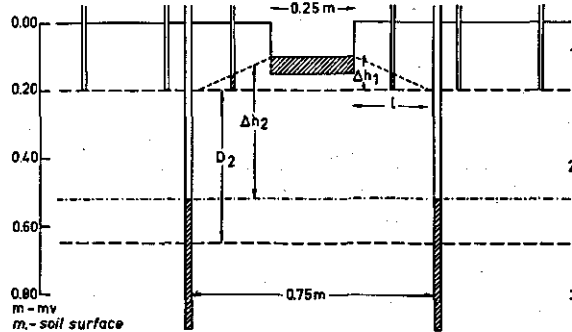


FIG. 19a. Determination of the hydraulic conductivity of the turf layer and the low-permeable layer by infiltration with a furrow, applying equations 3.11 and 3.12, on the drainage experimental field in the 'Tielerwaard' near Asperen. From June 16 to 23, 1958, the water level in the furrow has been kept at 0.10 m. below surface. As a result of swelling, K_1 decreased from 0.55 to 0.27 m/day and K_2 from 0.127 to 0.062 m/day. 1 = turf layer; 2 = low-permeable layer; 3 = high-permeable layer

verschil gemiddeld over de strook van wegzijging, 40 cm. De doorlaatfactor van de slecht doorlatende laag bedroeg derhalve één dag na het begin van de meting 0,127 m/dag en na één week 0,062 m/dag.

In de twee daaropvolgende weken (figuur 19b, c) werd het peil in de sleuf verhoogd tot 5 en 2 cm -mv, waardoor de stroming zich over een grotere oppervlakte uitstrekte en het waterverbruik groter was, maar per week vrijwel constant bleef. De doorlaatfactor werd voor de weken van 23 tot 30 juni en 30 juni tot 7 juli respectievelijk op 0,057 en 0,065 m/dag berekend. In de periode van 7 tot 18 juli (figuur 19d) werd de diepe potentiaal verhoogd door infiltratie via de drains. Hierdoor en door dichtzwellen van scheuren in de zodelaag, was het waterverbruik lager dan in de voorafgaande week maar het bleef vrij constant gedurende deze periode. Voor de doorlaatfactor werd een waarde van 0,072 m/dag berekend.

FIG. 19b. Van 23 tot 30 juni bedroeg het sleufpeil 0,05 m -mv en werd voor K_1 een waarde van 0,55 m/dag berekend, voor K_2 een waarde van 0,057 m/dag

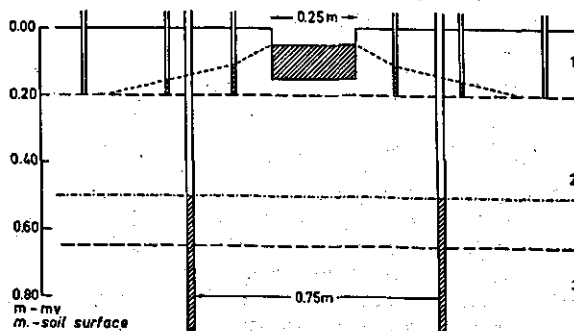


FIG. 19b. From June 23 to 30, the water level in the furrow has been kept at 0.05 m. below surface. For K_1 a value of 0.55 m/day has been calculated, for K_2 a value of 0.057 m/day

FIG. 19c. Van 30 juni tot 7 juli bedroeg het sleufpeil 0,02 m -mv en werd voor K_1 een waarde van 0,55 m/dag berekend, voor K_2 een waarde van 0,065 m/dag

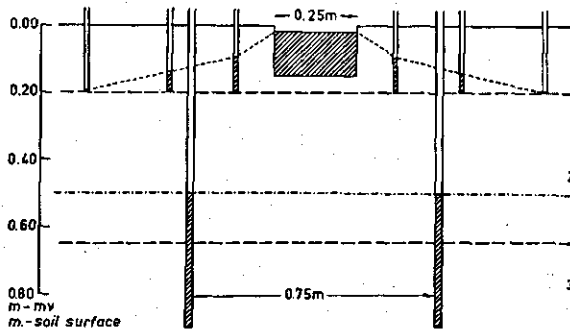


FIG. 19c. From June 30 to July 7, the water level in the furrow has been kept at 0.02 m. below surface. For K_1 a value of 0.55 m/day has been calculated, for K_2 a value of 0.065 m/day

Voor de bepaling van de doorlaatfactor van de slecht doorlatende laag kan men ook infiltrometers toepassen, die tot de onderkant van de zodelaag in de grond gedrukt worden, waardoor de horizontale stroming door de zodelaag voorkomen wordt. Hier-voor kunnen ringen (31) of bakken (7) worden toegepast. In het geval van ringen worden vaak concentrische ringen gebruikt, waarbij de buitenring dient om, indien beneden de onderkant van de infiltrometer zijdelingse stroming optreedt, het zijde-lingse waterverlies van de binnenring zoveel mogelijk te beperken. Bij een onder-zoek van EVANS, KIRKHAM en FREVERT (6), waarbij een stroming in zijdelingse richting gemeten werd door waterstandsmetingen, werd echter geen verschil vastgesteld tussen

FIG. 19d. Van 7 tot 18 juli bedroeg het sleufpeil 0,02 m -mv. De potentiaal in de goed doorlatende ondergrond werd 0,15 m verhoogd door infiltratie via de drains. Door dichtzwellen van scheuren in de zode laag was K_1 lager dan van 30 juni tot 7 juli. Voor K_1 werd een waarde van 0,26 m/dag berekend, voor K_2 een waarde van 0,072 m/dag

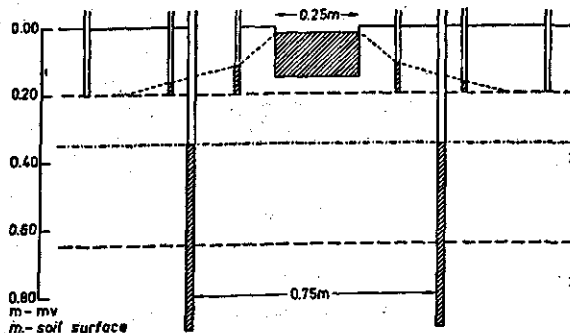


FIG. 19d. From July 7 to 18, the water level in the furrow has been kept at 0.02 m. below surface. The potential in the high-permeable subsoil has risen 0.15 m, as a result of sub-irrigation through the tile lines. As a consequence of swelling in the turf layer, K_1 was lower than from June 30 to July 7. For K_1 a value of 0.26 m/day has been calculated, for K_2 a value of 0.072 m/day

het waterverbruik van ringen met een diameter van 0,15 m, geplaatst in het centrum van een ring met een diameter van 3,60 m, en deze grote ring.

Bij dit onderzoek werden als infiltrometer drie naast elkaar geplaatste bakken toegepast, elk ter lengte van 2 m, ter breedte van 0,25 m en met een oppervlakte van 0,5 m², die tot 0,15 à 0,20 m diepte in de grond werden geslagen. Aan bakken werd de voorkeur gegeven, daar deze ook in de sleuf geplaatst konden worden ter afsluiting van de zodelaag en zij gemakkelijker te transporteren waren in vergelijking met ringen van eenzelfde oppervlakte. In het algemeen kon niet worden vastgesteld, dat de middelste bak een systematisch lager waterverbruik had dan de randbakken en de onderlinge verschillen waren gering zonder afwijkende hoge of lage waarden, zodat van de drie bakken het rekenkundig gemiddelde werd bepaald. Alleen bij indroging en scheurvorming in de zomer werd soms een lager waterverbruik in de middelste bak vastgesteld. Ook bij het gebruik van de infiltrometer werden waterstandsmetingen in de slecht doorlatende laag verricht om het stromingsveld zo goed mogelijk te begrenzen en werd de potentiaal in de goed doorlatende ondergrond gemeten voor de bepaling van het verticale potentiaalverschil.

Theoretisch zou het gewenst zijn om de infiltrometers tot de onderkant van de slecht doorlatende laag in de grond te slaan. In verband met de weerstand bij het inslaan en uittrekken is dit echter praktisch onmogelijk.

TABEL 12. De doorlaatfactor in m/dag van de slecht doorlatende laag op het drainageproefveld in de Tielerwaard bij Asperen, bepaald van 16 juni tot 18 juli 1958 d.m.v. infiltratie met een sleuf, en van 28 augustus tot 8 september 1958 en van 9 tot 18 maart 1959 met een infiltrometer

Datum	Doorlaatfactor in m/dag
16 juni – 23 juni	0,127–0,062
23 juni – 30 juni	0,057
30 juni – 7 juli	0,065
7 juli – 18 juli	0,072
28 aug. – 9 sept.	0,046
9 maart – 18 maart	0,048
Date	Hydraulic conductivity in m/day

TABLE 12. The hydraulic conductivity in m/day of the low-permeable layer on the drainage experimental field in the 'Tielerwaard' near Asperen, measured from June 16 to July 18, 1958 by infiltration with a furrow and from August 28 to September 8, 1958 and from March 9 to 18, 1959 with an infiltrometer

In tabel 12 is het resultaat van de bepaling door middel van infiltratie met een sleuf en met een infiltrometer op het drainageproefveld in de Tielerwaard bij Asperen samengevat. Gedurende de eerste week nam de doorlaatfactor af, maar daarna bleef deze vrijwel constant evenals tijdens de bepaling met de infiltrometer. Hierbij kan opgemerkt worden, dat van 7 tot 23 juli de grondwaterstand door infiltratie via de drainreeksen verhoogd werd tot 40 cm –mv en dat in de periode van 23 juli tot 28 augustus 150 mm neerslag viel (het gemiddelde van de nabijgelegen stations Gorcum

en Herwijnen met respectievelijk 156 en 144 mm). Het vochtgehalte van de slecht doorlatende laag, dat volgens een vochtbemonstering overeenkwam met het evenwichtsvochtgehalte na de beëindiging van de infiltratie, zal derhalve weinig verandering hebben kunnen ondergaan tot het begin van de infiltrometerbepaling en ook in maart 1959 ongeveer gelijk geweest zijn. Uit tabel 12 blijkt, dat de bepaling met een sleuf, waarbij stroming in de zodelaag optreedt, bij verschillende infiltratiepeilen tot eenzelfde doorlaatfactor van de slecht doorlatende laag leidt en in overeenstemming is met de bepaling met een infiltrometer waarbij horizontale stroming door de zodelaag voorkomen wordt.

e. De invloed van verschillende factoren op de doorlaatfactor van de slecht doorlatende laag

Van de in de vorige paragrafen genoemde methoden ter bepaling van de doorlaatfactor levert de infiltratiemethode met sleuven of infiltrometers waarschijnlijk de meest representatieve waarde op, daar geen verstoring van het profiel plaats vindt. Derhalve werd deze methode gebruikt om de invloed van verschillende factoren op de doorlaatfactor na te gaan, terwijl in een enkel geval ook de ringmethode met brokkelige breukvlakken werd toegepast.

De doorlaatfactor van de slecht doorlatende laag is afhankelijk van de weersomstandigheden, de grondwaterstand en de profieleigenschappen. Naarmate het vochtgehalte afneemt, neemt de scheurvorming en daarmee de doorlaatfactor toe. Derhalve kan er in de loop van het jaar, afhankelijk van de weersomstandigheden en de grondwaterstand, een verandering in de doorlaatfactor optreden.

Uit tabel 12 bleek reeds, dat op het drainageproefveld in de Tielerwaard bij Asperen de doorlaatfactor gedurende de meting in juni 1958 afnam van 0,127 tot 0,062 m/dag en na een week een constante waarde had bereikt. Na een periode met een hoge grondwaterstand van 0,40 m -mv in juli en een periode met een neerslagoverschot in augustus werd aan het einde van de zomer ongeveer dezelfde waarde bepaald, evenals aan het einde van de daaropvolgende winter.

Daarentegen werd op het drainageproefveld in de Tielerwaard bij Dalem in mei 1958 een doorlaatfactor van 0,043 m/dag bepaald, die gedurende de meting geen verandering vertoonde. Nadat in de tussenliggende periode de grondwaterstand op 0,70 à 0,80 m -mv gehouden was, bedroeg de doorlaatfactor in september 1958, 0,36 m/dag en na een meting van twee weken 0,12 m/dag. In maart 1959 werd weer dezelfde waarde voor de doorlaatfactor gemeten als in mei 1958.

Op het drainageproefveld in de Tielerwaard bij Hellouw, waar de grondwaterstand in de zomer 0,90 à 1,00 m -mv bedroeg, werd in augustus 1958 een doorlaatfactor van 0,5 m/dag bepaald, die na een meting van twee weken gedaald was tot 0,25 m/dag. In maart 1959 werd een doorlaatfactor van 0,20 m/dag bepaald.

Hieruit blijkt, dat er grote verschillen in de doorlaatfactor van de slecht doorlatende laag kunnen voorkomen in de loop van het jaar ten gevolge van scheurvorming en dichtzwellling. Het proces van dichtzwellling dat plaatsvindt onder invloed van de regenval, al of niet gecombineerd met een verhoging van de grondwaterstand, kan in de grond in natuurlijke ligging lange tijd in beslag nemen. In het laboratorium vindt, bij

ringmonsters van 100 cc, dit proces echter veel sneller plaats, waarop in paragraaf III, 4b naar aanleiding van de bepaling van de pF -kromme nader wordt teruggekomen.

Reeds eerder werd er op gewezen, dat waterstandsbuizen in de slecht doorlatende laag niet bruikbaar zijn voor de bepaling van het verticale potentiaalverschil. Wel kan het voorkomen van waterstanden in deze buizen als een aanwijzing voor de aanwezigheid van een slecht doorlatende laag worden beschouwd. Het bleek dat op percelen waar de grondwaterstand in de winter onder invloed van nabijgelegen weteringen met een laag peil meer dan 1 m diep was, zelden waterstanden gemeten werden voor januari of februari in de buizen geplaatst in de slecht doorlatende laag. Ook dit wijst er op, dat de dichtzwellen van scheuren in de grond in natuurlijke ligging geruime tijd duurt.

Ook door verandering in de temperatuur en daarmee in de viscositeit kan de doorlaatfactor veranderen, echter niet in die mate als door scheurvorming. Bij een temperatuurverschil van 15°C , dat volgens metingen van PEERLKAMP (22) ongeveer optreedt tussen de gemiddelde zomer- en winter-temperatuur op een diepte van 0,30 tot 1,00 m -mv, is de doorlaatfactor door de afname van de viscositeit in de zomer 1,5 maal zo groot als in de winter.

De verandering van de doorlaatfactor door scheurvorming en dichtzwellen is afhankelijk van het vochtgehalte en derhalve enerzijds van de weersomstandigheden, anderzijds van de grondwaterstand, zoals ook blijkt uit een vergelijking van de in 1958 uitgevoerde bepalingen op de drainageproefvelden bij Asperen en bij Dalem. De scheurvorming, die in de zomer optreedt bij een diepere grondwaterstand, verdwijnt echter in de loop van de herfst en winter. Behalve door de mogelijkheid van scheurvorming kan de grondwaterstand ook van invloed zijn op de doorlaatfactor door een structuurverandering van meer blijvende aard in de vorm van toe- of afname van de wortel- en wormgangen.

Voor de vaststelling van een dergelijk effect dient de bepaling van de doorlaatfactor te geschieden in een periode, waarin geen droogtescheuren meer aanwezig zijn. Op het grondwaterstandsproefveld „De Vlierd”, gelegen op komgrond in de Bommelerwaard, werd in het voorjaar van 1959 geen verschil in de doorlaatfactor van de slecht doorlatende laag vastgesteld tussen de graslandobjecten waarop gedurende het gehele jaar een constante grondwaterstand van 0,65; 0,95 en 1,40 m -mv wordt gehandhaafd. Het object met een constante grondwaterstand van 0,40 m -mv vertoonde weliswaar een lagere doorlaatfactor, maar dit moet worden toegeschreven aan een sterke mate van vertrapping door beweiding, waarop nader wordt teruggekomen in paragraaf III, 3b.

Op het grondwaterstandsproefveld op oude Dollard-klei te Nieuw-Beerta werd wel een verschil in doorlaatfactor gedurende de winter vastgesteld (11). Het verschil met het grondwaterstandsproefveld „De Vlierd” kan verschillende oorzaken hebben. Op het tijdstip van de bepaling was het proefveld te Nieuw-Beerta reeds meer dan 10 jaar in bedrijf en het proefveld „De Vlierd” eerst 5 jaar. Daarnaast is er een verschil in uitgangstoestand, daar op het proefveld te Nieuw-Beerta vóór de aanleg een diepe ontwatering bestond, die op sommige vakken door een hoge waterstand vervangen is, en op het proefveld „De Vlierd” een ondiepe ontwatering, die op sommige vakken door een lagere waterstand vervangen is. Wellicht is in het tweede geval een langere periode nodig om tot een verbetering van de doorlaatfactor te komen, dan om in het eerste geval een afname van de doorlaatfactor te veroorzaken. Tenslotte is er een verschil in bodemprofiel, daar het slibgehalte op het proefveld te Nieuw-Beerta ongeveer 65% bedraagt en op het proefveld „De Vlierd” ca. 90% in de slecht doorlatende laag. Ook dit kan tot een tragere reactie, of tot een achterwege blijven van de reactie leiden.

Ook de invloed van het profiel op de doorlaatfactor van de slecht doorlatende laag moet worden bepaald in een periode, waarin geen droogtescheuren meer aanwezig

zijn. In de slecht doorlatende laag komen in wisselende mate ijzerafzettingen voor, doorgaans als vlekken en soms als fijne concreties. De mate, waarin ijzer voorkomt, werd bij de profielbeschrijving aangegeven in een schaal van 0 tot 5, waarbij b.v. het cijfer 3 betekent, dat op een breukvlak $\frac{3}{5}$ van de oppervlakte roestig is. De zogenaamde laklaag, die zich onderscheidt door het vrijwel ontbreken van ijzerafzettingen en door een lakachtige glans op de breukvlakken, wordt vaak in het bijzonder als slecht doorlatend beschouwd.

Van de laklaag op het drainageproefveld in de Maaskant en de beide aangrenzende lagen, waarin de mate van ijzervlekken gekarakteriseerd werd door de cijfers 3 en 2, werden de doorlaatfactoren in ringmonsters bepaald. Tussen de gemiddelde doorlaatfactoren van 20 ringmonsters per laag kon geen significant verschil worden vastgesteld. De gemiddelde doorlaatfactor van de drie lagen bedroeg 0,06 m/dag. Ook kon geen verschil worden bepaald door middel van de infiltrometermethode waarbij achtereenvolgens de bovenliggende laag en de laklaag verwijderd werden.

Evenmin kon bij de doorlatendheidsbepaling met de infiltrometermethode op 20 plekken een verband tussen de doorlaatfactor en het ijzercijfer worden vastgesteld. De doorlaatfactor van de slecht doorlatende laag varieerde van 0,024 tot 0,11 m/dag en bedroeg gemiddeld 0,05 m/dag.

Alleen in die gevallen, waarin de ijzerafzettingen niet als vlekken, maar in de vorm van fijne concreties voorkwamen, bedroeg de doorlaatfactor 0,2 à 0,4 m/dag.

f. Het woelen van de slecht doorlatende laag

Door middel van het woelen van de slecht doorlatende laag kan getracht worden de doorlaatfactor van deze laag te verbeteren. Deze maatregel werd sinds 1953 op een aantal proefvelden en in ruilverkavelingsverband op een aantal kavels in het Land van Maas en Waal en de Bommelerwaard toegepast, waarbij in het algemeen gewoeld werd tot een diepte van 0,60 à 0,70 m -mv. Afhankelijk van verschillende omstandigheden, zoals de stand van het woellichaam en de ganzevoet, de afstand tussen de woelgangen en de vochtigheidstoestand van de grond werd een meer of mindere mate van verbrokkeling bereikt.

De resultaten van deze maatregel werden gedurende enige jaren vervolgd. Hierbij werd gebruik gemaakt van waterstandsbuizen in de slecht doorlatende laag. Het voorkomen van waterstanden in deze ondiepe buizen op een hoger niveau dan in de buizen waarvan het filter in de goed doorlatende ondergrond geplaatst is, kan als een aanwijzing voor de aanwezigheid van een slecht doorlatende laag beschouwd worden. Gedurende de vijf opeenvolgende winterperiodes van 1954-'55 tot en met 1958-'59, waarin het onderzoek plaats vond, bleken op gewoelde objecten de waterstanden in de ondiepe buizen in mindere mate en op een lager niveau voor te komen dan op niet gewoelde objecten. Bij een diepe potentiaal van meer dan 1,00 m -mv werd in dit opzicht vrijwel geen verschil vastgesteld. In tabel 13a en 13b wordt de reactie van de buizen, geplaatst in de slecht doorlatende laag, op een woelproefveld op grasland weergegeven.

Op grasland kon alleen verschil in plasvorming vastgesteld worden, indien de weersomstandigheden tijdens of na de groundbewerking voor de herinzaai van het grasland

TABEL 13a. De reactie van de buizen van 0,5 m, geplaatst in de slecht doorlatende laag, tijdens een neerslagperiode op een woelproefveld op grasland. De diepe potentiaal bedroeg minder dan 1,00 m -mv

Datum	Neerslag in mm	Object	Waterstand in de 0,5 m-buis		
		niet gewoeld - gewoeld +	droog	30-50 cm -mv	< 30 cm -mv
15-12-'55	7,2	-	30%	55%	15%
		+	50	50	
16-12-'55	10,7	-			100
		+	50	50	
17-12-'55	3,7	-		30	70
		+	50	50	
19-12-'55	0,0	-	100		
		+	100		
Date	Precipitation in mm.	non-subsoiled - subsoiled +	dry	30-50 cm. below surface	< 30 cm. below surface
		Plot	Water table in the 0.5 m. piezometer		

TABEL 13a. The reaction of the piezometers, long 0.5 m., placed in the low-permeable layer, during a precipitation period on an experimental field on subsoiling (grassland). The deep potential was less than 1.00 m. below surface

TABEL 13b. Als tabel 13a. De diepe potentiaal bedroeg meer dan 1,00 m -mv

Datum	Neerslag in mm	Object	Waterstand in de 0,5 m-buis		
		niet gewoeld - gewoeld +	droog	30-50 cm -mv	< 30 cm -mv
15-12-'55	7,2	-	85%	15%	
		+	100		
16-12-'55	10,7	-	100		
		+	100		
17-12-'55	3,7	-	100		
		+	100		
19-12-'55	0,0	-	100		
		+	100		
Date	Precipitation in mm.	non-subsoiled - subsoiled +	dry	30-50 cm. below surface	< 30 cm. below surface
		Plot	Water table in the 0.5 m. piezometer		

TABEL 13b. The same as table 13a. The deep potential was more than 1.00 m. below surface

ongunstig waren geweest. In dat geval kwam op gewoelde objecten vrijwel geen plasvorming voor in tegenstelling met niet gewoelde objecten. Op bouwland vertoonde zich soms een verschil in het opdrogen van de bouwvoor en de bewerkbaarheid ten gunste van gewoelde objecten, dat echter na één of twee dagen weer verdwenen was.

TABEL 14. De opbrengst van een woelproefveld op grasland in kg droge stof per are

Jaar	Object	1e snede	2e snede	3e snede	4e snede	5e snede	Totaal
	niet gewoeld - gewoeld +						
1955	-		23,4	20,8	10,2	11,6	66,0
	+		27,2	21,8	10,0	12,4	71,4
1956	-	17,2	27,8	15,2	12,8	13,2	86,2
	+	20,6	29,4	16,2	15,6	13,2	95,0
1957	-	25,6	15,8	10,4	14,4	14,8	81,0
	+	29,2	18,0	10,0	15,0	14,6	86,8
1958	-	22,2	17,4	16,6	13,2	11,6	81,0
	+	23,0	17,4	15,4	11,6	10,0	77,4
1959	-	22,2	16,4	8,4	14,4		61,4
	+	23,2	15,4	6,4	12,8		57,8
Year	non-subsoiled - subsoiled + Plot	1st cut	2nd cut	3rd cut	4th cut	5th cut	Total

TABLE 14. The yield in kg. dry matter per are of an experimental field on subsoiling (grassland)

Op een woelproefveld op grasland werden sinds 1955 met uitzondering van de eerste snede van dat jaar en de laatste snede van 1959 opbrengsten bepaald, waarvan het resultaat in tabel 14 is weergegeven. In de eerste en tweede snede van 1955 t/m 1957 bleek een significant verschil ten gunste van de gewoelde objecten op te treden, evenals in de vierde snede van 1956. In deze jaren hebben de voorjaarsgroei en de groei tijdens de natte zomer van 1956 (18 juli tot 22 augustus: 124 mm neerslag) gunstig gereageerd op het woelen. In de eerste en tweede snede van 1958 en 1959 kon geen significant verschil worden vastgesteld, terwijl de overige sneden in 1958 en 1959 zelfs een significant verschil ten gunste van de niet gewoelde objecten opleverden.

Op twee bouwlandproefvelden werden in 1956 de opbrengsten van suikerbieten en in 1957 de opbrengsten van suiker -en voederbieten bepaald, waarbij geen verschil kon worden vastgesteld.

Men kan zich afvragen wat de oorzaak van het opbrengstverschil op grasland is en waarom dit niet op bouwland optreedt. Het graslandproefveld werd in 1954 aangelegd, waarbij door zware regenval kort na de herinzaai op de nog onbedekte grond een groot verschil in plasvorming tussen de gewoelde en niet gewoelde objecten ontstond. Het hierbij opgetreden structuurbederf in de zodelaag op de niet gewoelde objecten, dat niet door latere grondbewerking ongedaan gemaakt kon worden, zoals op bouwland mogelijk is, zou een verklaring voor het opbrengstverschil in de eerste jaren kunnen zijn. In verband met de resultaten van het grondbewerkingsdiepte-proefveld op grasland van MINDERHOUD (19) kan de verklaring ook gelegen zijn in de diepere grondbewerking op de gewoelde objecten. Voor de herinzaai op grasland is de grondbewerkingsdiepte doorgaans 10 à 12 cm, maar op de gewoelde objecten vinden de werktuigen een gemakkelijker aangrijpingspunt in de opengebroken grond en is de grondbewerkingsdiepte 15 à 20 cm. Op bouwland is de grondbewerkingsdiepte echter

in beide gevallen 15 à 20 cm. Bij een diepere grondbewerking voor de herinzaai op grasland wordt de oorspronkelijke zodelaag over een grotere diepte verdeeld en komt aanvankelijk meer stikstof uit de humus vrij, wat een opbrengstverhogende invloed heeft. In latere jaren vindt daarentegen meer stikstofvastlegging plaats bij de opbouw van de nieuwe zodelaag, wat een opbrengstverlagende invloed heeft. Bij bemonsteringen van de laag 0,00 tot 0,05 m -mv werd inderdaad een significant verschil in humusgehalte vastgesteld, dat op de gewoelde en niet gewoelde objecten in oktober 1955 respectievelijk 10,2% en 11,0%, en in november 1958 respectievelijk 11,6% en 12,4% bedroeg.

Als een nadeel van het woelen moet in de eerste plaats de ongelijke, enigszins hobbelige, maaivelds-ligging genoemd worden. De ter plaatse van de woelsleuven opgeleverde grond wordt bij de grondbewerking voor de herinzaai geëgaliseerd over een grotere oppervlakte en nadat eerst de ligging vrij egaal is, treden later op de woelsleuven zakkingen op. Een tweede bezwaar is de eis, die aan de vochttoestand van de grond gesteld moet worden. De grond moet namelijk niet te nat zijn in verband met de gewenste verbrokkeling en niet te droog in verband met de trekkracht. Hierdoor wordt de periode, waarin de werkzaamheden kunnen worden uitgevoerd, beperkt. In verband met het geringe voordeel en de aan de uitvoering verbonden bezwaren werd het woelen van de slecht doorlatende laag sinds 1956 niet meer in het schema van het herontginningsplan in het Land van Maas en Waal en de Bom-melerwaard toegepast.

g. Samenvatting

Indien voor de bepaling van de doorlaatfactor van de slecht doorlatende laag een boring in deze laag moet worden verricht, kan door het dichtsmen van de grote poriën de doorlaatfactor rondom het boorgat zodanig verminderen, dat de waterstanden in boorgaten of buizen zich met een zeer grote vertraging instellen. Hierdoor zal bij de boorgatenmethode en bij de berekening van de doorlaatfactor uit het verticale potentiaalverschil, in het algemeen een te geringe doorlaatfactor bepaald worden. Dit is ook het geval bij de bepaling van de doorlaatfactor aan ringmonsters, indien deze aan boven- en onderkant glad worden afgesneden. Ter voorkoming hiervan verdient het aanbeveling de structuuraggregaten aan de boven- en onderkant zorgvuldig te verwijderen om de natuurlijke structuur zo goed mogelijk te handhaven. Tengevolge van scheuren en wortelgangen kunnen zeer hoge doorlaatfactoren in de betrekkelijk kleine monsters voorkomen en is de spreiding groot. Ook bij de bepaling van de doorlaatfactor van de slecht doorlatende laag met de boorgatenmethode en aan ringmonsters verdient het meetkundig gemiddelde de voorkeur boven het rekenkundig gemiddelde.

Bij de bepaling door middel van infiltratie met sleuven of infiltrometers komen deze bezwaren niet voor, daar geen verstoring in de slecht doorlatende laag plaats vindt en de doorlaatfactor over een veel grotere oppervlakte wordt bepaald dan bij de andere methoden, zodat de invloed van scheuren en wortelgangen over deze oppervlakte wordt verdeeld. De onnauwkeurigheid van deze bepaling is gelegen in de begrenzing van het stromingsveld. Uit de metingen, waarbij verschillende infiltratiepeilen in de sleuf werden toegepast, bleek echter dat dit op redelijke wijze mogelijk is.

Door scheurvorming en dichtzwellen kunnen in de loop van het jaar, afhankelijk van de weersomstandigheden en het vochtgehalte, grote verschillen in de doorlaat-

factor van de slecht doorlatende laag voorkomen. Bij de vaststelling van een blijvende invloed van de grondwaterstand en de profieleigenschappen moet hiermee rekening worden gehouden. Een blijvende invloed van de grondwaterstand op de doorlaatfactor kon tot nu toe niet worden vastgesteld, waarbij in aanmerking genomen moet worden, dat de tijd te kort was voor een definitieve uitspraak. Bij het voorkomen van fijne ijzerconcreties werd een doorlaatfactor van 0,2 à 0,4 m/dag bepaald. In het algemeen komen de ijzerafzettingen in de slecht doorlatende laag echter voor in de vorm van vlekken. Van de mate waarin deze ijzervlekken voorkomen, kon geen invloed op de doorlaatfactor worden vastgesteld. In deze gevallen bedroeg de doorlaatfactor van de slecht doorlatende laag gemiddeld 0,05 m/dag.

Het woelen van de slecht doorlatende laag levert enerzijds voordelen, anderzijds nadelen op. Het leidt tot een zekere toename van de doorlaatfactor en in de eerste jaren tot een hogere opbrengst van het grasland in het voorjaar en in een natte zomerperiode. In latere jaren verdwijnt dit opbrengstverschil en maakt plaats voor een tegengestelde reactie. Wanneer het woelen terstond gevolgd wordt door herinzaai van het grasland, treden zakkingen op ter plaatse van de woef sleuven met als gevolg een ongelijke ligging.

3. DE DOORLAATFACTOR VAN DE ZODELAAG

a. Bepaling van de doorlaatfactor

Bij de bepaling van de doorlaatfactor van de slecht doorlatende laag bleek reeds, dat door infiltratie met sleuven de doorlaatfactor zowel van de zodelaag als van de slecht doorlatende laag bepaald kan worden. Tengevolge van de oneffenheden in het maaiveld kan in het algemeen het peil in de sleuven niet hoger dan 2 à 3 cm onder maaiveld gesteld worden, zodat de doorlaatfactor van de bovenste centimeters niet bepaald wordt. In figuur 19a, b, c en d en in tabel 15 is het resultaat weergegeven van de bepaling op het drainageproefveld in de Tielerwaard bij Asperen.

Gedurende de eerste week van 16 tot 23 juni neemt de doorlaatfactor van de laag 0,10 tot 0,20 m -mv af van 0,55 tot 0,27 m/dag. In de daaropvolgende week wordt

TABEL 15. De doorlaatfactor in m/dag van de zodelaag op het drainageproefveld in de Tielerwaard bij Asperen, bepaald door infiltratie met sleuven in de periode van 16 juni tot 18 juli 1958

Datum	Laag in m -mv	Doorlaatfactor in m/dag
16 juni-23 juni	0,10-0,20	0,55-0,27
23 juni-30 juni	0,05-0,20	0,55
30 juni- 7 juli	0,02-0,20	0,55
7 juli -18 juli	0,02-0,20	0,26
Date	Layer in m. below surface	Hydraulic conductivity in m/day

TABLE 15. The hydraulic conductivity in m/day of the turf layer on the drainage experimental field in the 'Tielerwaard' near Asperen, measured by infiltration with a furrow in the period from June 16 to July 18, 1958

voor de laag 0,05 tot 0,20 m -mv een doorlaatfactor van 0,55 m/dag bepaald.

Waarschijnlijk neemt de doorlaatfactor verder af, zodat in de week van 30 juni tot 7 juli geen hogere doorlaatfactor voor de laag 0,02 tot 0,20 m -mv wordt gevonden. In de laatste periode is de doorlaatfactor gedaald tot 0,26 m/dag.

Wanneer de doorlaatfactor van de zodelaag echter laag is door bijzondere omstandigheden, waarop in de volgende paragraaf nader zal worden ingegaan, kan de bepaling niet geschieden met behulp van een sleuf, daar vrijwel geen zijdelingse stroming in de zodelaag plaats vindt. Onder deze omstandigheden kan de bepaling met behulp van een infiltrometer worden toegepast. Bij plaatsing van de infiltrometer op het maai-veld wordt uit het verticale potentiaalverschil en de afvoersnelheid de totale verticale weerstand van de zodelaag en de slecht doorlatende laag bepaald, en bij plaatsing op 0,20 m -mv de verticale weerstand van de slecht doorlatende laag afzonderlijk. Hieruit kunnen de verticale weerstand en de doorlaatfactor van de zodelaag berekend worden.

Bij de infiltrometerbepaling geldt in het algemeen voor het verticale potentiaalverschil:

$$\Delta h_{vert} = a \left(\frac{D_1}{K_1} + \frac{D_2}{K_2} + \frac{D_3}{K_3} \right) \quad (3.13)$$

Daar de doorlaatfactor van de goed doorlatende ondergrond enige dm à m/dag bedraagt, kan de verticale weerstand in deze laag D_3/K_3 worden verwaarloosd. Onder normale omstandigheden bij een dikte van 0,20 m en een doorlaatfactor van 0,25 à 0,5 m/dag bedraagt de verticale weerstand van de zodelaag D_1/K_1 0,5 à 1 dag en bedraagt de verticale weerstand van de slecht doorlatende laag D_2/K_2 10 dag bij een dikte van 0,50 m en een doorlaatfactor van 0,05 m/dag. De verticale weerstand van de zodelaag is in dat geval klein ten opzichte van de verticale weerstand van de slecht doorlatende laag, zodat de bepaling van de doorlaatfactor van de zodelaag met behulp van de infiltrometer, hoewel theoretisch mogelijk, niet kan worden toegepast wegens de onnauwkeurigheid van de bepaling.

Onder bijzondere omstandigheden kan de doorlaatfactor van de zodelaag echter dalen tot minder dan 0,01 m/dag. Dan bedraagt de verticale weerstand van de zodelaag 20 dag of meer en kan zelfs zo groot worden, dat de verticale weerstand van de slecht doorlatende laag verwaarloosd kan worden ten opzichte van die van de zodelaag.

Ook kan de bepaling van de doorlaatfactor aan ringmonsters in het laboratorium plaats vinden. In tabel 16 is de meetkundig gemiddelde doorlaatfactor van een serie van 8 tot 12 ringmonsters van 100 cc per laag van 5 cm weergegeven voor de zodelaag op het drainageproefveld in de Tielerwaard bij Asperen. Tevens zijn het poriënvolume en het humusgehalte vermeld. Op het tijdstip van bemonstering, die zowel op 2 april als op 2 oktober 1958 plaats vond, kwam het vochtgehalte overeen met het evenwichtsvochtgehalte. Tussen de beide bemonsteringen werd geen verschil vastgesteld. Voor de laag van 0,00 tot 0,20 m -mv als geheel bedraagt de meetkundig gemiddelde doorlaatfactor 0,41 m/dag, welke waarde tussen de waarden van 0,55 en 0,26 m/dag voor de laag van 0,02 tot 0,20 m -mv ligt, die na langdurige infiltratie met sleuven in juli 1958 werden bepaald.

De doorlaatfactor van de zodelaag vertoont een afname met de diepte evenals het humusgehalte en het poriënvolume. Indien binnen een ringmonster de doorlaatfactor afneemt, zal de laagste waarde in sterke mate bepalend zijn voor de doorlaatfactor van het gehele monster. Het is derhalve mogelijk, dat de bovenste centimeters van de zodelaag een hogere doorlaatfactor hebben dan volgens de bemonstering van de laag van 0,00 tot 0,05 m -mv wordt bepaald.

TABEL 16. De doorlaatfactor in m/dag van de zodelaag op het drainageproefveld in de Tielerwaard bij Asperen, bepaald als het meetkundig gemiddelde van 8 tot 12 ringmonsters van 100 cc, en het poriënvolume in volumepercent en het humusgehalte in gewichtspercent. Monstername op 2 april en 2 oktober 1958

Laag in m -mv	Doorlaatfactor in m/dag	Poriënvolume in %	Humus in %
0,00-0,05	0,95	67,5	15,8
0,05-0,10	0,49	62,5	11,6
0,10-0,15	0,24	57,2	5,7
0,15-0,20	0,17	55,0	4,6
Layer in m. below surface	Hydraulic conductivity in m/day	Pore volume in %	Humus in %

TABLE 16. The hydraulic conductivity in m/day of the turf layer on the drainage experimental field in the 'Tielerwaard' near Asperen, calculated as the geometric mean of 8 to 12 measurements in undisturbed samples, and the pore volume in per cent and the humus content in per cent of weight. Sampling dates April 2 and October 2, 1958

b. De invloed van verscheidene factoren op de doorlaatfactor van de zodelaag

Uit tabel 15 blijkt, dat ook de doorlaatfactor van de zodelaag afhankelijk is van de weersomstandigheden, die het proces van scheurvorming en dichtzwellen beïnvloeden. Daar het vochtgehalte van de zodelaag in perioden met een neerslagtekort in veel sterkere mate afhankelijk is van de weersomstandigheden dan van de grondwaterstand zal in dit opzicht de grondwaterstand van weinig invloed zijn op de doorlaatfactor.

Daarentegen kan de grondwaterstand wel van invloed zijn op de doorlaatfactor van de zodelaag in perioden met een neerslagoverschot in samenhang met de beweiding van het grasland. De combinatie van hoge grondwaterstand, zware neerslag en beweiding kan in natte zomers leiden tot vertrapping van de zodelaag en zeer lage doorlaatfactoren veroorzaken, die eerst in de loop van een volgend groeiseizoen weer verdwijnen.

Op het grondwaterstandsproefveld „De Vlierd” werd in april 1959 op de grasland-objecten, waar de grondwaterstand in de winter 0,40; 0,65; 0,95 en 1,40 m -mv en in de zomer 0,40 m -mv bedraagt, een doorlaatfactor in de zodelaag van minder dan 0,005 m/dag bepaald, terwijl deze hoger lag op de objecten, waar de grondwaterstand gedurende het gehele jaar 0,65; 0,95 en 1,40 m -mv bedraagt.

Op een bedrijf in het Land van Maas en Waal bedroeg de grondwaterstand in de zomer van 1958 ongeveer 0,40 m -mv als gevolg van een hoog polderpeil ter plaatse. Die percelen, die bij zware regenval in de zomer werden beweide, werden in sterke mate vertrapt en daarop werden in januari en februari 1959 doorlaatfactoren van 0,001 à 0,005 m/dag bepaald, in tegenstelling tot de percelen die tijdens de regenperiode in de zomer niet werden beweide en een normale doorlaatfactor in de zodelaag vertoonden.

Ook op het proefbedrijf „De Hardepoel”, waar door een te geringe diepte van de drainreeksen de ontwateringstoestand onvoldoende is, werden dergelijke lage doorlaatfactoren in de zodelaag gemeten.

Uit deze drie gevallen, waarin op het bedrijf in het Land van Maas en Waal en op het proefbedrijf „De Hardepoel” de veebezetting circa 2 stuks omgerekend grootvee per ha bedroeg, blijkt het gevaar van een hoge zomergrondwaterstand bij intensieve beweiding. Hierdoor wordt bij zware regenval de zodelaag vertrappt en leidt de hierdoor veroorzaakte lage doorlaatfactor in volgende regenperioden tot plasvorming. Naarmate de neerslag zwaarder is, of de beweiding intensiever, zal dit verschijnsel ook bij lagere grondwaterstanden kunnen optreden, daar zelfs op het object met een constante grondwaterstand van 1,40 m -mv van het grondwaterstandsproefveld in de natte zomer van 1954 plasvorming voorkwam.

De vertrapping werkt vrij diep door en is ook van invloed op de doorlaatfactor van de slecht doorlatende laag. Na verwijdering van de bovenlaag ter dikte van 20 à 30 cm werd in deze gevallen namelijk een doorlaatfactor bepaald, die doorgaans wel hoger was dan in de zodelaag maar lager dan in de slecht doorlatende laag op vergelijkbare objecten. Er kon geen invloed van de vertrapping op het poriënvolume vastgesteld worden, zodat de verandering van het poriënvolume of gering is, of niet plaats vindt en waarschijnlijk binnen het poriënvolume een verandering in de poriënverdeling plaats vindt.

Uit tabel 16 bleek reeds, dat de doorlaatfactor en het humusgehalte van de zodelaag met de diepte onder het maaiveld afnemen. Het humusgehalte van de zodelaag vertoont ook verschillen, die afhankelijk zijn van de duur dat het perceel als grasland in

TABEL 17. Het poriënvolume in volumeprocent en het humusgehalte in gewichtsprocent, van de zodelaag op enige graslandpercelen in het Land van Maas en Waal. Op het moment van herinzaai in 1953 waren de percelen 5b, 15a en 17a in gebruik als grasland en de percelen 15b en 17b als bouwland. Tijdens de bemonstering in december 1958 bedroeg de doorlaatfactor van de zodelaag op de percelen 5b, 15a en 17a, 0,2 à 0,4 m/dag en op de percelen 15b en 17b, 0,003 à 0,005 m/dag

Laag in m -mv	5b		15a en 17a		15b en 17b	
	por. vol. in %	humus in %	por. vol. in %	humus in %	por. vol. in %	humus in %
0,00-0,05	68,5	18,3	56,7	10,8	50,8	7,8
0,05-0,10	61,5	13,7	55,1	7,5	49,5	5,0
0,10-0,15	57,8	6,8	54,6	6,0	47,0	3,4
0,15-0,20	54,5	4,8	50,2	3,1	48,1	2,3
Layer in m. below surface	por. vol. in %	humus in %	por. vol. in %	humus in %	por. vol. in %	humus in %
	5b		15a and 17a		15b and 17b	

TABEL 17. The pore volume in per cent and the humus content in per cent of weight, of the turf layer on some grassland parcels in the 'Land van Maas en Waal'. To the moment of resowing in 1953 the parcels 5b, 15a and 17a were used as grassland and the parcels 15b and 17b as arable land. During the sampling in December 1958, the hydraulic conductivity of the turf layer on the parcels 5b, 15a and 17a was 0.2 to 0.4 m/day and on the parcels 15b and 17b, 0.003 to 0.005 m/day

gebruik is en naarmate het daarvoor kortere of langere tijd als bouwland is gebruikt. Dit verschil in humusgehalte gaat samen met een verschil zowel in het poriënvolume als in de doorlaatfactor van de zodelaag.

In tabel 17 is het verband weergegeven tussen het humusgehalte en het poriënvolume van de zodelaag op enige graslandpercelen in het Land van Maas en Waal, die in 1953 in ruilverkavelingsverband opnieuw werden ingezaaid. Vóór dat moment waren de percelen 15b en 17b, die tot dezelfde kavels behoren als 15a en 17a, als bouwland in gebruik en de percelen 5b, 15a en 17a als grasland. Gezien het humusgehalte zijn de percelen 15a en 17a klaarblijkelijk een aantal jaren daarvoor ook als bouwland in gebruik geweest. In december 1958 vond de bemonstering voor het poriënvolume en het humusgehalte plaats en tevens de bepaling van de doorlaatfactor door middel van de sleuf- en infiltrometermethode. Er werd geen verschil in de doorlaatfactor van de zodelaag vastgesteld tussen de percelen 5b, 15a en 17a, waar deze 0,2 à 0,4 m/dag bedroeg, maar de doorlaatfactor was op de percelen 15b en 17b veel lager, namelijk 0,003 à 0,005 m/dag.

Hieruit blijkt, dat door een langdurig gebruik als bouwland het humusgehalte zodanig kon dalen, dat dit een ongunstige invloed heeft op de doorlaatfactor van de zodelaag. In deze gevallen bleef dit verschijnsel tot de bovenste 20 cm beperkt daar, na verwijdering van deze laag, met de infiltrometer een normale doorlaatfactor in de slecht doorlatende laag werd bepaald.

Zowel in het geval van vertrapping als van een laag humusgehalte kan de doorlaatfactor minder dan 0,005 m/dag bedragen en wordt de zodelaag de beperkende factor voor de verticale waterstroming naar de goed doorlatende ondergrond, in plaats van de slecht doorlatende laag. Op dergelijke percelen komt dan ook bij lichte regenval reeds spoedig plasvorming voor en is de stijging van de potentiaal in de goed doorlatende ondergrond door de geringe verticale waterstroming veel kleiner dan op percelen, waar deze slecht doorlatende zodelaag niet aanwezig is.

Wanneer de goed doorlatende bovenlaag gevormd wordt door de bouwvoor, kan de doorlaatfactor behalve onder invloed van de weersomstandigheden ook veranderen door de grondbewerkingen. In het bijzonder na het ploegen kunnen deze veranderingen zeer groot zijn. De doorlaatfactor kan op dezelfde wijze bepaald worden als die van de zodelaag. Bij de bepaling door middel van infiltratie met een sleuf zal de doorlaatfactor doorgaans verminderen door samendrukking van de grond bij de aanleg van de sleuf. Er werden geen doorlaatfactoren van de bouwvoor bepaald.

c. *Samenvatting*

De doorlaatfactor van de zodelaag en bouwvoor kan bepaald worden door middel van infiltratie met een sleuf of een infiltrometer en aan ringmonsters. In het algemeen bedraagt de doorlaatfactor 0,2 à 0,5 m/dag, indien de bepaling of de monsternamen plaats heeft op percelen, waarvan het vochtgehalte overeenkomt met het evenwichtsgehalte, en hij vertoont een tendens van afnemen met de diepte. Vertrapping van vochtgehalte, en hij vertoont een tendens van afnemen met de diepte. Vertrapping van vochtgehalte, die afhankelijk is van de combinatie van grondwaterstand, neerslag en beweiding, kan zeer lage doorlaatfactoren van minder dan 0,005 m/dag ten gevolge hebben. Ook een laag humusgehalte van het grasland na een langdurig gebruik als bouwland kan de oorzaak zijn van een dergelijke lage doorlaatfactor. In deze geval-

len, waarin doorgaans tijdens regenperioden plasvorming voorkomt, is de doorlaatfactor van de zodelaag kleiner dan de doorlaatfactor van de slecht doorlatende laag en vormt de zodelaag de beperkende factor voor de verticale waterstroming.

4. DE BERGINGSCOËFFICIËNT EN DE BERGING VAN DE GROND

a. Definitie

In figuur 20 is de volumefractie lucht weergegeven bij verschillende grondwaterstanden in een komgrondprofiel, wanneer het vochtgehalte van de grond overeenkomt met het evenwichtsvochtgehalte. Hieronder wordt het vochtgehalte verstaan waarbij de zuigspanning overeenkomt met de desbetreffende hoogte boven de grondwaterstand. Bij verandering van de grondwaterstand blijkt een wijziging in de vochttoestand van het gehele profiel op te treden, zowel in het traject van de grondwaterstandsverandering als daarboven. Men kan derhalve onderscheid maken tussen de bergingscoëfficiënt van het gehele profiel en de bergingscoëfficiënt van het traject van de grondwaterstandsverandering en deze als volgt omschrijven:

1. De verhouding van de hoeveelheid water die in het gehele profiel geborgen wordt of vrijkomt tot de grondwaterstandsverandering, indien het vochtgehalte voor en na de verandering overeenkomt met het evenwichtsvochtgehalte.

2. De verhouding van de hoeveelheid water die in het traject van de grondwaterstandsverandering geborgen wordt of vrijkomt tot de grondwaterstandsverandering, indien het vochtgehalte voor en na de verandering overeenkomt met het evenwichtsvochtgehalte.

De bergingscoëfficiënt van het traject van de grondwaterstandsverandering kan worden toegepast bij de berekening van de reservoir-coëfficiënt in de niet-stationaire stroming, daar in dat geval de geborgen hoeveelheid water in het traject van de grondwaterstandsverandering maatgevend is. De bergingscoëfficiënt van het gehele profiel kan worden toegepast ter berekening van de hoeveelheid water, die aan het profiel wordt toegevoegd of onttrokken bij een verandering van de grondwaterstand. Ook kan de bergingscoëfficiënt van het gehele profiel toegepast worden ter berekening van de reservoircoëfficiënt, indien van de eenvoudiger veronderstelling wordt uitgegaan dat de berging niet in het gehele profiel, maar volledig geconcentreerd in het traject van de grondwaterstandsverandering plaats vindt. Onder bepaalde omstandigheden, zoals in hoofdstuk IV en V beschreven wordt, is het noodzakelijk van deze veronderstelling uit te gaan. De bergingscoëfficiënt is een dimensieloze constante, daar het een hoeveelheid water per oppervlakte-eenheid en per grondwaterstandsverandering betreft.

Met het volgende voorbeeld kan het verschil worden toegelicht. In het geval van figuur 20 bedraagt de wijziging in de totale vochthoeveelheid bij een grondwaterstandsverandering tussen 0,80 en 1,00 m -mv 7,2 mm, waarvan 3,0 mm in het traject van de grondwaterstandsverandering zelf. De bergingscoëfficiënten van het gehele profiel en van het traject van de grondwaterstandsverandering bedragen respectievelijk $7,2/200 = 0,036$ en $3/200 = 0,015$. Verschilt een tweede profiel slechts in de hogere lagen, dan kan de bergingscoëfficiënt van het gehele profiel veranderen, terwijl de bergingscoëfficiënt van het beschouwde traject van de grondwaterstandsverandering gelijk blijft.

Bij het proces van vochtafgifte en opname treedt het hysteresiseffect op, waardoor

het evenwichtsvochtgehalte afhankelijk is van de wijze waarop dit bereikt wordt en groter is in het geval van vochtafgifte dan in het geval van vochtopname. Bij de verschillende methoden ter bepaling van de bergingscoëfficiënt werd het evenwichtsvochtgehalte bereikt door vochtafgifte. Van de pF -kromme werd namelijk alleen de vocht-afgevendende tak bepaald, de grond-water-luchtverhouding werd na een regenperiode in het voorjaar bepaald, terwijl van de grondwaterstandsverandering alleen de daling voor de berekening van de bergingscoëfficiënt kan worden toegepast, zoals nader blijken zal in paragraaf III, 4d. De aldus bepaalde bergingscoëfficiënt wordt in hoofdstuk IV en V, bij de berekening van het grondwaterstandsverloop in afvoerperioden, toegepast zowel tijdens de daling als tijdens de stijging. Gedurende de stijging van de grondwaterstand in afvoerperioden vindt de bevochtiging van het profiel namelijk plaats onder invloed van overtollige neerslag en niet door aanvoer uit het grondwater-reservoir, zoals bij infiltratie het geval is. Tijdens de indringing van neerslag in de grond treedt eerst vochtopname aan het bevochtigingsfront op, die gevolgd wordt door vochtafgifte, zoals uit het onderzoek van YOUNGS (32) blijkt, en bij stijging van de grondwaterstand vindt vochtafgifte plaats uit het profiel boven het freatisch niveau.

Onder de berging van het profiel of van een bepaalde laag wordt de hoeveelheid water verstaan, die opgenomen kan worden totdat het profiel of de laag volledig verzadigd is. In tegenstelling met de bergingscoëfficiënt is de berging niet constant, maar afhankelijk van het vochtgehalte dat verandert onder invloed van neerslag en verdamping. Daar het een hoeveelheid water per oppervlakte eenheid betreft, zal de berging worden uitgedrukt in mm.

b. Bepaling door middel van de pF -kromme

Voor de bepaling van de pF -kromme werden 17 komgrondprofielen in de jaren 1953-1957 per laag van 10 cm in twee- of drievoud bemonsterd tot een diepte van 1,00 m -mv. Wat de zodelaag van deze profielen betreft, waarvan het humusgehalte in de laag van 0,00 tot 0,10 m -mv steeds meer dan 10% en in de laag van 0,10 tot 0,20 m -mv meer dan 5% bedroeg, werd geen correlatie tussen de ligging van de pF -kromme en het humusgehalte vastgesteld. Evenmin werden in de slecht doorlatende laag waarden vastgesteld, die een samenhang vertoonden met profielkenmerken als kleur en ijzergehalte. In de goed doorlatende ondergrond, waarvan het gedeelte van 0,70 tot 1,00 m -mv bemonsterd werd, waren het poriënvolume en de volumefracties lucht bij verschillende pF -waarden in venige lagen groter dan in humeuze en concreterijke lagen. Deze gegevens van venige lagen werden niet verwerkt in het gemiddelde.

In verband met het grote verschil in doorlaatfactor tussen de zodelaag van de percelen 5b en 15b, vermeld in tabel 17, werd in 1959 ook de pF -kromme van de zodelaag van deze percelen bepaald. Er werd een verschil in de ligging van de pF -kromme vastgesteld, waarbij de volumefractie lucht bij lage pF -waarden geringer was op perceel 15b met het lage humusgehalte. Dit wijst op een geringer percentage grote poriën en is in overeenstemming met het verschil in doorlaatfactor.

Tussen de pF -krommen van de laklaag en de beide aangrenzende lagen, waarvan ook de doorlaatfactoren werden bepaald (paragraaf III, 2e) kon geen verschil worden vastgesteld. Van concreterijke zones in de slecht doorlatende laag werden geen pF -krommen bepaald. Op grond van de bepalingen in de concreterijke goed doorlatende ondergrond kan worden aangenomen, dat de volumefractie lucht bij verschillende pF -waarden in dat geval groter is dan normaal in de slecht doorlatende laag.

TABEL 18. Het poriënvolume en de volumefracties lucht in volumepercent bij verschillende pF -waarden en het slib- en humusgehalte in gewichtspercent, voor een komgrondprofiel

Laag in m -mv	Por. vol. in %	Volumefractie lucht in % bij pF				Slib < 16 μ in %	Humus in %
		1,0	1,5	2,0	4,2		
0,00-0,10	63,8	3,2	5,2	7,6	32,9	76,8	13,4
0,10-0,20	58,8	4,3	5,1	6,8	26,2	82,5	6,6
0,20-0,30	56,3	2,5	4,2	4,9	22,5	85,8	3,1
0,30-0,40	54,8	1,2	1,6	2,9	19,4	89,5	2,0
0,40-0,50	56,0	1,1	1,4	2,6	18,9	91,6	1,6
0,50-0,60	58,4	0,8	1,6	2,8	22,3	92,0	2,3
0,60-0,70	58,9	1,0	1,7	2,8	24,7	90,3	2,4
0,70-0,80	60,3	1,5	2,4	4,0	27,6	87,6	2,5
0,80-0,90	63,4	1,3	2,8	4,7	32,5	82,5	3,3
0,90-1,00	64,0	1,8	3,5	5,1	33,7	77,9	4,0

Layer in m. below surface	Por. vol. in %	Volume air fraction in % at pF				Fraction < 16 μ in %	Humus in %
		1,0	1,5	2,0	4,2		

TABLE 18. The pore volume and the volume air fraction in per cent at different pF -values, the fraction < 16 μ and the humus content in per cent of weight, for a basin clay soil

In tabel 18 zijn het poriënvolume en de volumefracties lucht bij verschillende pF -waarden weergegeven van het uit de gegevens van de 17 profielen gemiddelde komgrondprofiel, alsmede het slib- en humusgehalte. In deze waarden kan men de opeenvolging van de zodelaag, slecht doorlatende laag en goed doorlatende ondergrond onderscheiden.

Uit de gegevens van tabel 18 kan de volumefractie lucht berekend worden bij verschillende grondwaterstanden, indien het vochtgehalte gelijk is aan het evenwichts-

FIG. 20. Volumefractie lucht bij verschillende grondwaterstanden in een komgrondprofiel, berekend uit de pF -kromme, waarbij aangenomen wordt dat het vochtgehalte overeenkomt met het evenwichtsvochtgehalte

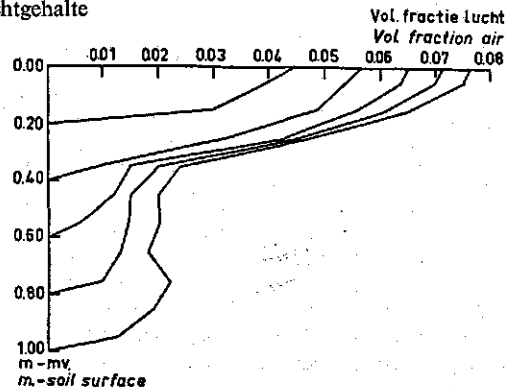


FIG. 20. Volume air fraction at different ground-water levels in a basin clay profile, calculated from the pF -curve, assuming that the moisture content is equal to the equilibrium moisture content

vochtgehalte. Daar in dat geval de zuigspanning gelijk is aan de betreffende hoogte boven de grondwaterstand, bedraagt de pF -waarde op 10, 30 en 100 cm boven de grondwaterstand respectievelijk 1,0; 1,5 en 2,0. Bij deze pF -waarden werd de volumefractie lucht bepaald, terwijl voor de tussengelegen waarden de volumefractie lucht kan worden geïnterpoleerd. In figuur 20 is de op deze wijze berekende volumefractie lucht bij verschillende waterstanden weergegeven.

Uit de gegevens van figuur 20 kunnen de bergingscoëfficiënten van het gehele profiel en van het traject van de grondwaterstandsverandering berekend worden. Het resultaat is in tabel 19 vermeld per grondwaterstandsverandering van 0,20 m. Hieruit blijkt, dat de bergingscoëfficiënten variëren voor de verschillende lagen en dat men ook hierin de zodelaag, de slecht doorlatende laag en de goed doorlatende ondergrond kan onderscheiden.

TABEL 19. De bergingscoëfficiënten van het gehele profiel en van het traject van de grondwaterstandsverandering, voor een komgrondprofiel

Grondwaterstandsverandering in m -mv	Bergingscoëfficiënt in	
	gehele profiel	traject van de grondwaterstandsverandering
0,00-0,20	0,032	0,032
0,20-0,40	0,039	0,020
0,40-0,60	0,028	0,009
0,60-0,80	0,026	0,011
0,80-1,00	0,036	0,015
Change of ground-water level in m. below surface	total profile	part with change of ground-water level
	Storage coefficient in	

TABLE 19. The storage coefficients of the total profile and of the part in which the change of ground-water level takes place, for a basin clay soil

Ter vergelijking met het komgrondprofiel zijn in tabel 20a en 20b het poriënvolume, de volumefracties lucht bij verschillende pF -waarden en het slib- en humusgehalte weergegeven van een knikklei-op-zavelprofiel uit Groningen en een Dollard-kleiprofiel, eveneens gemiddeld uit de gegevens van enige profielen. Deze profielen worden in de praktijk ook beschouwd als zware, moeilijk bewerkbare kleigronden. De laag van 0,00 tot 0,20 m -mv betreft in deze gevallen niet de zodelaag, maar de bouwvoor. Op dezelfde wijze als bij het komgrondprofiel zijn hieruit de bergingscoëfficiënten van het gehele profiel en van het traject van de grondwaterstandsverandering berekend, die vermeld zijn in tabel 21a en 21b. Van het knikklei-op-zavelprofiel blijken de bergingscoëfficiënten in het algemeen lager, van het Dollard-kleiprofiel hoger te zijn dan van het komgrondprofiel.

Aan deze bepalingmethode van de bergingscoëfficiënt is het bezwaar verbonden, dat met luchtinsluiting geen rekening gehouden wordt, hetgeen een te hoge waarde kan opleveren. Bij de bepaling van de pF -kromme werd verzadiging onder vacuum

TABEL 20a. Het poriënvolume en de volumefracties lucht in volumepercent bij verschillende pF -waarden, en het slib- en humusgehalte in gewichtspercent voor een knikklei-op-zavel-profiel

Laag in m -mv	Por. vol. in %	Volumefractie lucht in % bij pF			Slib <16 μ in %	Humus in %
		1,0	2,0	4,2		
0,00-0,10	50,0	6,6	10,5	29,7	45,8	2,5
0,10-0,20	46,7	4,3	7,4	24,5	45,7	2,4
0,20-0,30	42,7	0,8	2,7	17,8	47,1	2,0
0,30-0,40	44,7	0,9	2,7	15,7	56,5	1,2
0,40-0,50	44,6	0,4	1,7	16,8	51,4	0,8
0,50-0,60	41,6	0,4	1,3	12,0	54,2	0,7
0,60-0,70	42,8	0,7	1,8	19,1	41,8	0,6
0,70-0,80	43,5	0,7	2,2	22,1	33,1	0,6
0,80-0,90	45,8	1,2	2,5	24,7	27,5	0,6
0,90-1,00	46,5	1,3	3,4	30,2	25,4	0,6
Layer in m. below surface	Por. vol. in %	1,0	2,0	4,2	Fraction <16 μ in %	Humus in %
		Volume air fraction in % at pF				

TABLE 20a. The pore volume and the volume air fraction in per cent at different pF -values, the fraction <16 μ and the humus content in per cent of weight, for a sticky-clay-on-sandy-clay soil

toegepast, waardoor de lucht geheel uit het monster werd verwijderd. Onder natuurlijke omstandigheden komt luchtinsluiting doorgaans beneden de grondwaterstand voor, waarvan in de volgende paragraaf enige voorbeelden worden gegeven.

Een tweede bezwaar van deze methode betreft de zwelling, die bij de pF -bepaling in zware kleigrond blijkt op te treden en plaats vindt ten koste van de grote poriën. Hierdoor worden te lage waarden voor de volumefractie lucht bij pF -waarden van 1,0; 1,5

TABEL 20b. Idem, voor een Dollard-klei-profiel

Laag in m -mv	Poriën- volume in %	Volumefractie lucht in % bij pF			Slib < 16 μ in %	Humus in %
		1,0	2,0	4,2		
0,00-0,10	53,7	7,9	15,1	31,7	61,0	3,2
0,10-0,20	47,9	1,4	5,0	22,3	58,2	3,4
0,20-0,30	47,6	1,3	5,0	21,2	51,9	1,9
0,30-0,40	51,3	1,0	6,3	22,7	55,8	2,2
0,40-0,50	55,8	1,7	7,9	24,3	57,5	2,0
0,50-0,60	56,1	3,5	8,9	24,0	66,2	2,1
0,60-0,70	60,1	3,0	8,8	24,0	66,9	2,2
0,70-0,80	60,1	1,3	5,5	23,8	66,0	2,6
0,80-0,90	59,8	0,7	3,6	22,8	55,6	2,8
0,90-1,00	58,8	1,5	4,9	19,3	53,5	4,2
Layer in m. below surface	Por. vol. in %	1,0	2,0	4,2	Fraction < 16 μ in %	Humus in %
		Volume air fraction in % at pF				

TABLE 20b. The same for a marine-clay soil (Dollard-clay)

TABEL 21a. De bergingscoëfficiënten van het gehele profiel en van het traject van de grondwaterstandsveranderingen, voor een knikklei-op-zavelprofiel

Grondwaterstandsverandering in m -mv	Bergingscoëfficiënt in	
	gehele profiel	traject van de grondwaterstandsverandering
0,00-0,20	0,053	0,053
0,20-0,40	0,028	0,009
0,40-0,60	0,022	0,005
0,60-0,80	0,021	0,007
0,80-1,00	0,028	0,012
<i>Change of ground-water level in m. below surface</i>	<i>total profile</i>	<i>part with change of ground-water level</i>
	<i>Storage coefficient in</i>	

TABLE 21a. The storage coefficients of the total profile and of the part in which the change of ground-water level takes place, for a sticky-clay-on-sandy-clay soil

en 2,0 bepaald, waardoor ook een te lage waarde voor de bergingscoëfficiënt berekend wordt. Tengevolge van de zwellings kan ook de verandering, die in de poriënverdeling en in de pF -kromme moet optreden door indroging en scheurvorming, niet worden bepaald met de methoden waarbij van een monster in verzadigde toestand wordt uitgegaan.

Van een serie monsters, waarvan het luchtgehalte bij de bemonstering ongeveer 7% bedroeg, werd een gedeelte gedroogd tot luchtgehalten van 17, 27 en 37%, waarbij in toenemende mate krimp en scheurvorming optrad. Op grond hiervan zou men een toename van de volumefractie grote poriën en derhalve een toename van de volumefractie lucht bij pF -waarden van 1,0; 1,5 en 2,0 mogen verwachten bij de bepaling van de pF -krommen van deze tot verschillend luchtgehalte uitgedroogde gronden. Na

TABEL 21b. Idem, voor een Dollard-kleiprofiel

Grondwaterstandsverandering in m -mv	Bergingscoëfficiënt in	
	gehele profiel	traject van de grondwaterstandsverandering
0,00-0,20	0,052	0,052
0,20-0,40	0,031	0,014
0,40-0,60	0,062	0,028
0,60-0,80	0,070	0,025
0,80-1,00	0,057	0,012
<i>Change of ground-water level in m. below surface</i>	<i>total profile</i>	<i>part with change of ground-water level</i>
	<i>Storage coefficient in</i>	

TABLE 21b. The same for a marine-clay soil (Dollard-clay)

een verzadigingsduur van 60 uur was de scheurvorming echter visueel geheel verdwenen en kon ook geen verschil tussen de pF -krommen worden vastgesteld.

De structuurverschillen tussen de objecten van het grondwaterstandsproefveld te Nieuw-Beerta in de vorm van een toename van de volumefractie grote poriën bij diepere grondwaterstand konden wel door verschillen tussen de pF -krommen worden aangetoond (11), hoewel ook bij deze kleigrond met een slijbgehalte van ongeveer 65% zwelling optrad. Het verschil tussen de resultaten van bovengenoemde proef en van het grondwaterstandsproefveld te Nieuw-Beerta kan daardoor worden verklaard, dat bij bovengenoemde proef de verschillen alleen veroorzaakt werden door droogtescheuren en op het grondwaterstandsproefveld zowel door droogtescheuren als door wortel- en wormgangen; de laatste zijn meer bestendig. Bij kunstmatige indroging treden alleen droogtescheuren op, bij langdurige indroging onder natuurlijke omstandigheden zullen ook de wortel- en wormgangen toenemen. Hierop wijst ook de tendens, die bij vergelijking van de pF -krommen van de 17 komgrondprofielen aanwezig was, dat de volumefractie lucht bij pF -waarden van 1,0; 1,5 en 2,0 groter was na de langdurige droge herfst in 1953 dan in andere jaren.

c. Bepaling door middel van de grond-water-luchtverhouding

De bepaling van de grond-water-luchtverhouding kan geschieden door een ringbemonstering, waarbij de volumefractie water direct bepaald wordt, of door vochtspanningsmetingen waaruit de volumefractie water via de pF -kromme wordt afgeleid. Na bepaling van de volumefractie grond kan de volumefractie lucht als restfactor berekend worden. Voor een bepaling in een periode waarin het vochtgehalte zo goed mogelijk overeenkomt met het evenwichtsvochtgehalte, is een tijdstip in het voorjaar het meest geschikt bij het begin van het groeiseizoen, wanneer zowel de neerslag als de verdamping gering zijn. In tabel 22 is de volumefractie lucht weergegeven van een bemonstering op het grondwaterstandsproefveld „De Vlierd” in april 1958. Het betreft

TABEL 22. De volumefractie lucht bij verschillende grondwaterstanden, bepaald uit de grond-water-luchtverhouding in april 1958 op een graslandperceel van het grondwaterstandsproefveld „De Vlierd”, gelegen op komgrond in de Bommelerwaard

Laag in m -mv	Volumefractie lucht in % op				
	vak 25	vak 40	vak 65	vak 95	vak 140
0,00-0,10	3,5	3,1	9,1	9,0	10,9
0,10-0,20	0,3	1,9	4,4	5,6	7,5
0,20-0,30	3,5	3,1	3,4	4,0	5,4
0,30-0,40	2,6	3,2	4,8	4,5	5,7
0,40-0,50	2,1	2,6	3,4	4,8	5,2
0,50-0,60	3,5	2,9	2,8	4,7	6,3
0,60-0,70	2,6	2,2	2,0	4,8	4,5
0,70-0,80	2,6	2,0	2,1	3,3	4,6
0,80-0,90	2,4	2,1	2,0	2,8	7,1
0,90-1,00	2,1	2,6	1,6	2,5	8,6
Layer in m. below surface	plot 25	plot 40	plot 65	plot 95	plot 140
	Volume air fraction in % on				

TABLE 22. The volume air fraction at different ground-water levels determined from the soil-water-air ratio in April 1958 on a grassland-parcel of the ground-water level experimental field 'De Vlierd', situated on basin clay soil in the Bommelerwaard

het graslandperceel, waarop 5 objecten zijn gelegen met een gedurende het gehele jaar constante grondwaterstand op 0,25; 0,40; 0,65; 0,95 en 1,40 m -mv, die respectievelijk vak 25, vak 40, vak 65, vak 95 en vak 140 genoemd zijn.

Uit tabel 22 blijkt, dat de volumefractie lucht toeneemt bij een diepere grondwaterstand en dat op de vakken 25, 40 en 65 gemiddeld 2,4 vol. % ingesloten lucht beneden de grondwaterstand voorkomt. Bij de berging, zoals dit begrip in paragraaf III, 4a is gebruikt, dient men met deze volumefractie ingesloten lucht rekening te houden. Aannemende, dat bij stijging van de grondwaterstand eenzelfde hoeveelheid lucht wordt ingesloten, dient voor de laag van 0,30 tot 1,00 m -mv van de vakken 95 en 140 de totale volumefractie lucht verminderd te worden met 2,4 vol. % om de aldus bepaalde volumefractie vrije lucht te kunnen vergelijken met de volumefractie lucht volgens de pF -kromme bij het evenwichtsvochtgehalte. Dit is weergegeven in tabel 23.

De op bovengenoemde wijze bepaalde volumefractie vrije lucht, stemt goed overeen met de volumefractie lucht berekend volgens de pF -kromme. De berging van de laag van 0,30 tot 1,00 m -mv bedraagt op vak 95 volgens de volumefractie vrije lucht 10,6 mm en volgens de pF -kromme 10,8 mm. Op vak 140 bedraagt de berging respectievelijk 25,2 en 21,7 mm.

TABEL 23. Vergelijking van de volumefractie „vrije lucht” in april 1958 met de volumefractie lucht volgens de pF -kromme bij het evenwichtsvochtgehalte voor de laag 0,30 tot 1,00 m -mv op het grondwaterstandsproefveld „De Vlierd”. De volumefractie „vrije lucht” is berekend door de volumefractie lucht, uit tabel 22, te verminderen met de gemiddelde beneden de grondwaterstand ingesloten volumefractie lucht (2,4%)

Laag in m -mv	Volumefractie lucht in % op			
	vak 95		vak 140	
	„vrij”	volgens <i>pF</i> -kromme	„vrij”	volgens <i>pF</i> -kromme
0,30-0,40	2,1	2,1	3,3	2,9
0,40-0,50	2,4	1,9	2,8	2,5
0,50-0,60	2,3	1,8	3,9	2,6
0,60-0,70	2,4	1,7	2,1	2,5
0,70-0,80	0,9	2,0	2,2	3,4
0,80-0,90	0,4	1,3	4,7	3,8
0,90-1,00	0,1	0,0	6,2	4,0
Layer in m. below surface	‘free’	according to <i>pF</i> -curve	‘free’	according to <i>pF</i> -curve
	plot 95		plot 140	
	Volume air fraction in % on			

TABLE 23. Comparison of the volume fraction of ‘free air’ in April 1958 and the volume air fraction, calculated from the pF -curve at the equilibrium moisture content, for the layer 0.30 to 1.00 m. below surface on the ground-water level experimental field ‘De Vlierd’. The volume fraction of ‘free air’, calculated by subtracting from the volume air fraction of table 22, the mean volume fraction of air trapped below the ground-water level (2.4 vol. %)

Op het grondwaterstandsproefveld te Nieuw-Beerta bedroeg de volumefractie lucht beneden de grondwaterstand in het eerste jaar na de aanleg 5 à 10 vol. %, maar was na enige jaren gedaald tot minder dan 1 vol. %. Het verschil met de volumefractie lucht van 2,4 vol. % op het grondwaterstandsproefveld „De Vlierd”, waar de grondwaterstanden in 1954 werden ingesteld, kan zijn oorzaak vinden in het verschil in bodemprofiel, of in het feit dat op het laatste proefveld tussen 1954 en 1958 de grondwaterstand enige malen gedurende één à twee weken verlaagd werd ter reiniging van sloten en drains.

Op de drainageproefvelden in de Tielerwaard bij Asperen, Dalem en Hellouw werden in de zomer van 1957 en 1958 infiltratieproeven uitgevoerd. Na een infiltratieperiode van één à twee weken bedroeg de volumefractie lucht volgens bemonsteringen beneden de grondwaterstand in de laag van 0,40 tot 0,80 m -mv gemiddeld 2,8 vol. %.

In de loop van het groeiseizoen neemt de berging toe door indroging van de grond. Eveneens worden, naar uit vochtspanningsmetingen met nylonelementen van MINDERHOUD (20) blijkt, de verschillen in luchtgehalte tengevolge van een verschil in grondwaterstand, die in het voorjaar betrekkelijk klein zijn (tabel 22), groter, in het bijzonder beneden de zodelaag. Dit is in overeenstemming met bepalingen op het grondwaterstandsproefveld te Nieuw-Beerta (11), waar het verschil in luchtgehalte tengevolge van een verschil in grondwaterstand eveneens in het voorjaar gering is en toeneemt gedurende het groeiseizoen.

d. Bepaling door middel van de grondwaterstandsverandering

Uit de definitie van de bergingscoëfficiënt volgt, dat de bergingscoëfficiënt van het gehele profiel bepaald kan worden uit de hoeveelheid water die door het profiel wordt opgenomen of afgestaan, en de daarbij behorende grondwaterstandsverandering, indien het vochtgehalte voor en na de verandering overeenkomt met het evenwichtsvochtgehalte.

De grondwaterstand kan in een komgrondprofiel niet gemeten worden indien deze zich in de slecht doorlatende laag bevindt, tengevolge van de vertraging van de waarnemingsbuizen, zoals in paragraaf III, 2c werd uiteengezet. Daar de grondwaterstand echter weinig verschilt met de potentiaal in de goed doorlatende ondergrond, zal bij deze bepalingmethode voor een komgrondprofiel de potentiaal in de goed doorlatende ondergrond worden toegepast.

Uit tabel 1 blijkt, dat het potentiaalverschil in de goed doorlatende ondergrond ($\Delta h_{hor} + \Delta h_{rad}$) ongeveer 10% verschilt met het totale potentiaalverschil (Δh) bij een draindiepte van 0,80 à 1,00 m -mv, een diepe afvoersnelheid van 7 mm/dag en een totaal potentiaalverschil van 45 à 65 cm. In de periode, waarin deze bepalingmethode van de bergingscoëfficiënt kan worden toegepast, komen dergelijke waarden voor de diepe afvoersnelheid en het potentiaalverschil echter praktisch niet voor en is het verschil veel kleiner. Zoals nader blijken zal, kan deze methode feitelijk alleen toegepast worden tijdens het staartverloop van de grondwaterstandsval. Voor de objecten waar de bergingscoëfficiënt werd bepaald volgens deze methode, werd het verticale potentiaalverschil berekend uit de doorlaattfactor en doorstroomde dikte van de slecht doorlatende laag en de diepe afvoersnelheid. Hierbij bleek dat de potentiaal in de goed doorlatende ondergrond minder dan 5% verschilde met de grondwaterstand.

Wanneer de bergingscoëfficiënt berekend wordt uit de verhouding van de hoeveelheid water en de potentiaalverandering in de goed doorlatende ondergrond, moet de gemiddelde potentiaalverandering tussen de open watergangen worden toegepast. Deze bedraagt bij een ellipsvormig verloop $\frac{1}{4}\pi \sim 0,8$ maal de potentiaalverandering

gemeten midden tussen de open watergangen (Δh_3) en hij zal op deze wijze worden berekend, hoewel het potentiaalverloop in de niet-stationaire toestand afwijkt van de ellips.

In vergelijking met een ellipsvormig potentiaalverloop bedraagt het verschil maximaal 20% indien het potentiaalverloop horizontaal zou zijn. Uit waarnemingen op de betreffende objecten is gebleken, dat het potentiaalverloop tijdens de stijging minder afwijkt van een ellips dan van een horizontaal verloop en tijdens de daling vrijwel met een ellips overeenkomt. Deze geringe afwijking kan verklaard worden door de lage reservoircoëfficiënten.

Het is gewenst de bepaling uit te voeren in een periode, waarin het vochttekort van het profiel en de verdamping te verwaarlozen zijn, zodat het vochtgehalte zo goed mogelijk overeenkomt met het evenwichtsvochtgehalte bij het begin van de neerslagperiode en tijdens deze periode geen onttrekking door capillaire opstijging en verdamping plaats vindt. Uit het onderzoek van YOUNGS (31) over de vochtverdeling in grondkolommen tijdens en na indringing van water in de grond kan worden afgeleid, dat gedurende de regenval de evenwichtstoestand verbroken wordt, maar na het einde van de regenval op een zeker tijdstip, dat afhankelijk is van de neerslag en het bodemprofiel, weer bereikt zal worden.

Bij de bepaling van de bergingscoëfficiënt in de periode van de grondwaterstandsstijging kunnen dan ook, afhankelijk van het tijdstip van de bepaling, uit de berekening zeer verschillende waarden resulteren in verband met de tijdelijke vochtvermaat in het profiel boven de grondwaterstand ten opzichte van het evenwichtsvochtgehalte. De door het profiel boven en onder de grondwaterstand, dus in totaal, opgenomen hoeveelheid water kan voor elk tijdstip bepaald worden door de neerslag te verminderen met de afgevoerde hoeveelheid. Deze is gelijk aan de som van de ondiepe en de diepe afvoer en kan op gedraineerde percelen worden gemeten als de drainafvoer.

TABEL 24. De bergingscoëfficiënt van de laag 0,00 tot 0,70 m -mv, volgens een berekening uit de neerslag, verminderd met de afvoer, en de stijging van de potentiaal in de goed doorlatende ondergrond op verschillende tijdstippen na het begin van de stijging. Het betreft 3 objecten van het drainageproefveld in de Tielerwaard bij Asperen en de regenperiode van 31 oktober 1958

Object	Bergingscoëfficiënt na				
	1,5 uur	3,5 uur	6,5 uur	8,5 uur	22 uur
1	0,148	0,081	0,057	0,051	0,043
2	0,136	0,079	0,057	0,056	0,052
3	0,113	0,064	0,046	0,044	0,038
Plot	1,5 hour	3,5 hour	6,5 hour	8,5 hour	22 hour
	Storage-coefficient after				

TABLE 24. The storage-coefficient of the layer 0.00 to 0.70 m. below surface, calculated from the precipitation reduced with the discharge, and the rise of the potential in the high-permeable subsoil after different lengths of time following the start of the rise. The calculation concerns 3 plots of the drainage experimental field in the 'Tielerwaard' near Asperen and the precipitation period on October 31, 1958

Voor 3 objecten van het drainageproefveld in de Tielerwaard bij Asperen werd de bergingscoëfficiënt bepaald op verschillende tijdstippen na het begin van de stijging gedurende een regenperiode op 31 oktober 1958. Daar de potentiaal in de goed doorlatende ondergrond bij het begin van deze regenperiode 0,70 m -mv bedroeg, betreft het de bergingscoëfficiënt van de laag 0,00 tot 0,70 m -mv. Het resultaat is in tabel 24 weergegeven.

Volgens een bepaling van de grond-water-luchtverhouding met een ringbemonstering kwam het vochtgehalte in het begin van oktober vrijwel overeen met het evenwichtsvochtgehalte. De neerslag bedroeg in deze maand 62 mm (het gemiddelde van de nabijgelegen stations Gorcum en Herwijnen met respectievelijk 61 en 63 mm), zodat aangenomen kan worden dat het vochtgehalte bij het begin van deze regenperiode gelijk was aan het evenwichtsvochtgehalte. De verdamping, die in november ongeveer 0,15 mm/dag bedraagt, werd verwaarloosd bij de berekening.

Uit tabel 24 blijkt, dat een kleinere waarde voor de bergingscoëfficiënt berekend wordt, naarmate de tijdsduur sinds het begin van de stijging toeneemt. Op het laatste tijdstip was de daling van de potentiaal in de goed doorlatende ondergrond waarschijnlijk reeds begonnen. (In hoofdstuk IV, tabel 27b, zijn de waarnemingen van deze regenperiode vermeld.) Indien men de bergingscoëfficiënt wil bepalen uit de in het profiel geborgen hoeveelheid en de stijging van de grondwaterstand, verdient het tijdstip waarop de daling begint de voorkeur ter benadering van de evenwichtstoestand. De aldus bepaalde bergingscoëfficiënt zal doorgaans enigszins te hoog zijn, zoals blijkt uit een vergelijking met de in tabel 25 vermelde waarden, die op dezelfde objecten tijdens de daling werden bepaald.

Tijdens de daling kan de bergingscoëfficiënt volgens twee methoden worden berekend. In de eerste plaats kan de berekening geschieden uit de verhouding van de afgevoerde hoeveelheid en de potentiaalverandering in de goed doorlatende ondergrond. In de tweede plaats kan de bergingscoëfficiënt berekend worden uit het verband van de diepe afvoersnelheid, óf het potentiaalverschil in de goed doorlatende ondergrond, met de tijd. Uit de vergelijkingen 2.14, 2.15 en 2.16 kan worden afgeleid, dat de bergingscoëfficiënt als volgt berekend kan worden uit de constante verhouding tussen de afvoersnelheid en het potentiaalverschil tijdens het staartverloop:

$$\mu = 0,68 \cot \alpha \times \frac{a_3}{\Delta h_3} \quad (3.14)$$

Het begin van het staartverloop kan theoretisch berekend worden (15). Indien men de duur van de zakwaterstroming, althans die met de grootste intensiteit, gelijk stelt aan de regenperiode en deze 8 uur duurt, en de reservoircoëfficiënt 0,5 à 1 dag bedraagt, begint het staartverloop 12 à 18 uur na het einde van de regenval. Wanneer men een dergelijk tijdstip als het begin van de bepalingperiode kiest, dan zal op gedraineerde percelen in het algemeen ook geen ondiepe afvoer meer optreden, waardoor anders een te grote hoeveelheid uit het profiel vrijgekomen water zou worden afgeleid uit de drainafvoer. Tevens zal op een dergelijk tijdstip het evenwichtsvochtgehalte in het profiel beter benaderd worden dan bij het begin van de daling.

Naarmate de bepalingperiode langer duurt, kan de bergingscoëfficiënt nauwkeu-

riger worden vastgesteld. Ter vermindering van storende invloeden is het gewenst dat in deze periode geen neerslag valt en de afvoer niet wordt onderbroken door stijging van het slootpeil tot boven de eindrain. In verband met deze voorwaarden en door het ontbreken van zelfregistrerende afvoermeters was het slechts mogelijk de bergingscoëfficiënt volgens deze methode te bepalen op 6 objecten in het Land van Maas en Waal en 3 objecten van het drainageproefveld in de Tielerwaard bij Asperen.

FIG. 21a. Verband van het potentiaalverschil in de goed doorlatende ondergrond (Δh_3) in cm en de afvoersnelheid (a) in mm/dag, met de tijd (T) in dagen gedurende het staartverloop van een afvoerperiode van 12 tot 17 januari 1956. Het betreft een op 15 m afstand gedraineerd object in het Land van Maas en Waal

FIG. 21b. Idem. Het betreft een op 30 m afstand gedraineerd object in het Land van Maas en Waal

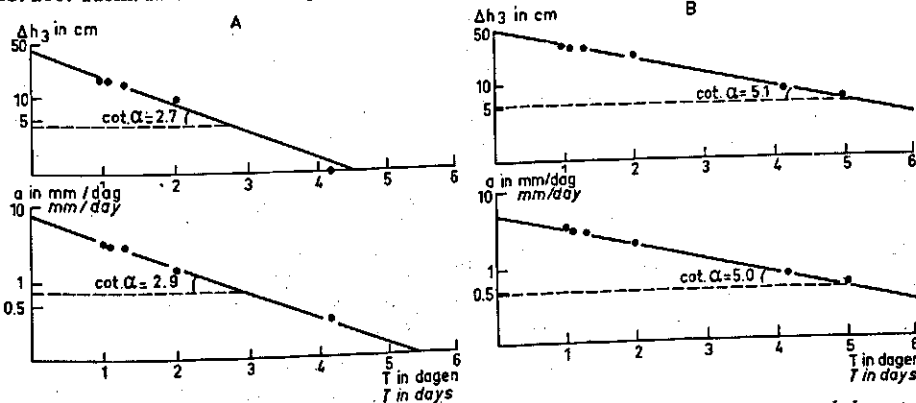


FIG. 21a. Relation of the potential difference in the high-permeable subsoil (Δh_3) in cm. and the rate of discharge (a) in mm/day with the time (T) in days during the tail recession of a discharge period from January 12 to 17, 1956. The observations are pertaining to a tile-drained parcel in the 'Land van Maas en Waal', with a drain spacing of 15 m.

FIG. 21b. The same. The observations are pertaining to a tile-drained parcel in the 'Land van Maas en Waal', with a drain spacing of 30 m.

In figuur 21a en b is het verband tussen het potentiaalverschil in de goed doorlatende ondergrond en de tijd, alsmede het verband tussen de afvoersnelheid en de tijd weer-gegeven tijdens het staartverloop van een afvoerperiode in januari 1956, waarin de potentiaal in de goed doorlatende ondergrond daalde tot 0,80 m -mv. Het betreft twee objecten in het Land van Maas en Waal, die op 15 en 30 m afstand gedraineerd zijn. Hieruit en uit de verhouding tussen de afvoersnelheid en het potentiaalverschil zijn. Hieruit en uit de verhouding tussen de afvoersnelheid en het potentiaalverschil tijdens het staartverloop werden voor de bergingscoëfficiënt van de laag van 0,00 tot 0,80 m -mv waarden van 0,038 en 0,029 berekend. Volgens de verhouding van de afgevoerde hoeveelheid en de daling van de potentiaal in de goed doorlatende ondergrond bedroegen deze waarden respectievelijk 0,035 en 0,028. Het verschil tussen beide berekeningsmethoden is dus gering, hetgeen ook in andere afvoerperiodes en op andere objecten het geval bleek te zijn. Hoewel de methode, die gebruik maakt van de niet-stationaire stromingsvergelijkingen theoretisch juist is, kon geen significant verschil tussen beide methoden worden vastgesteld. De hierna te vermelden waarden

TABEL 25. De bergingscoëfficiënt van de laag 0,00 tot 0,70 m -mv, berekend uit het staartverloop, na twee neerslagperiodes in november 1957 en 1958, en na een infiltratieperiode in juni 1957. Het betreft 3 objecten van het drainage proefveld in de Tielerwaard bij Asperen.

Object	Bergingscoëfficiënt			
	november 1957	november 1958	juni 1957	gemiddelde
1	0,042	0,036	0,045	0,041
2	0,042	0,042	0,036	0,040
3	0,026	0,032	0,028	0,029
Plot	November 1957	November 1958	June 1957	mean
Storage coefficient				

TABLE 25. The storage coefficient of the layer 0.00 to 0.70 m. below surface, calculated from the tail recession, after two precipitation periods in November 1957 and 1958, and after a period of subirrigation in June 1957. The calculation concerns 3 plots of the drainage experimental field in the 'Tielerwaard' near Asperen

van de bergingscoëfficiënt werden steeds bepaald als gemiddelde van beide berekeningsmethoden.

Er blijkt eveneens een goede overeenstemming te bestaan tussen de waarden van de bergingscoëfficiënt, die voor verschillende afvoerperiodes werden berekend. In tabel 25 is een vergelijking gemaakt tussen verschillende periodes voor de objecten van het drainageproefveld in de Tielerwaard bij Asperen. Het betreft twee periodes in de maand november van 1957 en van 1958 en een periode in juni 1957, waarin de grondwaterstand na een infiltratieperiode werd verlaagd.

In tabel 26 zijn de waarden van de bergingscoëfficiënt van de laag van 0,00 tot 0,70 à 0,80 m -mv samengevat, die werden bepaald op 6 gedraineerde objecten in het Land van Maas en Waal en 3 objecten van het drainageproefveld in de Tielerwaard bij Asperen.

e. Samenvatting

De bergingscoëfficiënt kan gedefinieerd worden als de verhouding van de hoeveelheid water die, hetzij in het gehele profiel, hetzij in het traject van de grondwaterstandsverandering, geborgen wordt of vrijkomt tot de grondwaterstandsverandering, indien het vochtgehalte vóór en na de verandering overeenkomt met het evenwichtsvochtgehalte. De bergingscoëfficiënt is een constante, in tegenstelling tot de berging, die gedefinieerd kan worden als de hoeveelheid water die het profiel of een bepaalde laag kan opnemen totdat volledige verzadiging is bereikt.

De bepaling kan geschieden door middel van de pF -kromme, de grond-water-luchtverhouding en de grondwaterstandsverandering. Volgens de bepaling met de pF -kromme van het gemiddelde komgrondprofiel varieert in de laag van 0,00 tot 1,00 m -mv de bergingscoëfficiënt van het gehele profiel tussen 0,028 en 0,036 en de bergingscoëfficiënt van het traject van de grondwaterstandsverandering tussen 0,009 en 0,032. Aan deze bepalingsmethode is enerzijds het bezwaar verbonden, dat geen rekening gehou-

TABEL 26. De bergingscoëfficiënt van de laag 0,00 tot 0,70 à 0,80 m -mv, berekend uit het staartverloop na neerslagperioden, voor het drainageproefveld in de Tielerwaard bij Asperen en een aantal gedraineerde percelen in het Land van Maas en Waal

Proefveld of gedraineerd perceel	Aantal objecten	Bergingscoëfficiënt	
		spreiding	gemiddelde
Tielerwaard Asperen	3	0,029-0,041	0,037
Land van Maas en Waal	6	0,029-0,042	0,035
<i>Drainage experimental field or tile-drained parcel</i>	<i>Number of Plots</i>	<i>variation</i>	<i>mean</i>
<i>Storage coefficient</i>			

TABLE 26. The storage coefficient of the layer 0.00 to 0.70-0.80 m. below surface, calculated from the tail recession after precipitation periods, for the drainage experimental field in the 'Tielerwaard' near Asperen, and a number of tile-drained parcels in the 'Land van Maas en Waal'

den wordt met luchtinsluiting beneden de grondwaterstand, waardoor een te hoge waarde berekend kan worden. Anderzijds is er het bezwaar van de swelling die in zware kleigrond optreedt en die kan leiden tot een te lage waarde. Deze bezwaren compenseren elkaar min of meer, daar het resultaat van de bepaling met de pF -kromme in redelijke overeenstemming is met de resultaten van de andere bepalingmethoden.

Ter vergelijking met de bepaling door middel van de pF -kromme, werd op het grondwaterstandsproefveld „De Vlierd” de bepaling door middel van de grondwaterluchtverhouding toegepast. Hiervoor werd een tijdstip gekozen na een regenperiode in het voorjaar, wanneer verondersteld kan worden dat het vochtgehalte zo goed mogelijk overeenkomt met het evenwichtsvochtgehalte. De berging werd berekend, door de volumefractie lucht te verminderen met de volumefractie ingesloten lucht beneden de grondwaterstand. De aldus berekende waarden stemden goed overeen met de waarden volgens de pF -kromme.

Voor de bepaling door middel van de grondwaterstandsverandering verdient het staartverloop van de periode waarin de grondwaterstand daalt, de voorkeur boven de periode waarin de grondwaterstand stijgt, dit in verband met de benadering van het evenwichtsvochtgehalte in het profiel. Volgens deze methode werden voor de bergingscoëfficiënt van de laag van 0,00 tot 0,80 m -mv op 9 objecten waarden bepaald, die varieerden van 0,029 tot 0,042 met een gemiddelde van 0,036, hetgeen enigszins hoger is dan volgens de bepaling met de pF -kromme.

IV. VERGELIJKING VAN DE WAARNEMINGEN VAN ENIGE AFVOERPERIODEN MET DE WAARDEN, BEREKEND VOLGENS NIET-STATIONAIRE STROMINGSVERGELIJKINGEN

1. HET AFVOERPROCES IN HET GEVAL VAN DRAINAGE

In een komgrondprofiel kan tijdens een afvoerperiode zowel ondiepe als diepe afvoer optreden indien de regenintensiteit groter is dan de indringingssnelheid in de slecht doorlatende laag. Op gedraineerde percelen komt de ondiepe afvoer tot uiting in een vergroting van de drainafvoer. Deze vergroting kan niet gemeten worden als het verschil ten opzichte van de lijn, die het verband tussen de diepe afvoersnelheid en het potentiaalverschil in de goed doorlatende ondergrond weergeeft volgens een stationaire stromingsvergelijking of volgens een niet-stationaire stromingsvergelijking tijdens het staartverloop. Een dergelijk verschil, waarvan de afwijkende punten in figuur 12 een voorbeeld geven, kan namelijk ook veroorzaakt worden door het niet-stationaire verloop van het afvoerproces. Hierdoor is immers de diepe afvoersnelheid, voor het begin van het staartverloop, groter dan de waarde die bij hetzelfde potentiaalverschil tijdens het staartverloop optreedt. Wil men derhalve vaststellen in hoeverre ondiepe afvoer op gedraineerde percelen optreedt, dan dient men het verloop van de diepe afvoersnelheid en het potentiaalverschil in de goed doorlatende ondergrond tijdens een regenperiode te berekenen met de niet-stationaire stromingsformules en deze waarden te vergelijken met de waarnemingen.

a. *De berekening van de zakwaterstroming*

In verband met de toepassing van de niet-stationaire stromingsformules 2.12 en 2.13 moet de duur en de intensiteit van de zakwaterstroming bekend zijn. De zaksnelheid waarmee de neerslag zich bij de grondwaterzone voegt is niet gelijk aan de indringingssnelheid van de neerslag ter plaatse van het maaiveld of de slecht doorlatende laag, daar de berging in het gehele profiel plaats vindt. Zowel in de verzadigde als in de onverzadigde zone oefent de grond een bufferende werking uit. Uit de literatuur zijn geen metingen bekend over de zaksnelheid op verschillende niveaus in de onverzadigde zone tijdens en na regenval. Hier zal een methode gevolgd worden waarbij de zaksnelheid ter plaatse van de grondwaterstand in een bepaalde periode berekend wordt uit de diepe afvoer en de hoeveelheid water die geborgen wordt of vrijkomt in het traject van de grondwaterstandsverandering gedurende deze periode. Wanneer de grondwaterstand stijgt, moet de diepe afvoer vermeerderd worden met de geborgen hoeveelheid; wanneer de grondwaterstand daalt, moet de diepe afvoer daarentegen verminderd worden met de vrijgekomen hoeveelheid. Bedraagt de diepe afvoersnelheid bij het begin en einde van een periode van $3\frac{1}{2}$ uur respectievelijk 3,7 en 5,5 mm/dag en is de grondwaterstand 9 cm gestegen, dan wordt voor de gemiddelde zaksnelheid ter plaatse van de grondwaterstand in deze periode de volgende waarde berekend:

$$p = \frac{1}{24} \left(\frac{3,7 + 5,5}{2} \right) + \frac{2}{7} \times 0,01 \times 0,8 \times 90 = 0,40 \text{ mm/uur} = 9,6 \text{ mm/dag.}$$

Voor de bergingscoëfficiënt in het traject van de grondwaterstandsverandering wordt een waarde van 0,01 aangenomen, op grond van de bepaling met de pF -kromme van het gemiddelde komgrondprofiel. De potentiaalverandering op de betreffende objecten vond plaats tussen 0,40 en 0,80 m -mv. Hoewel de bergingscoëfficiënt varieert voor verschillende lagen in het profiel en wellicht ook door een wisselende mate van luchtinsluiting tijdens het afvoerproces, wordt uit rekentechnische overwegingen een constante waarde toegepast.

Evenals bij de bepaling van de bergingscoëfficiënt wordt in plaats van de grondwaterstand de potentiaal in de goed doorlatende ondergrond toegepast en de gemiddelde potentiaalverandering gesteld op 0,8 maal de potentiaalverandering, gemeten midden tussen de open watergangen. Als het begin van de zakwaterstroming ter plaatse van de grondwaterstand, wordt het begin van de stijging van de diepe potentiaal aangenomen. Volgens metingen met zelfregistrerende apparatuur ligt dit tijdstip 3 à 4 uur na het begin van de regenval, wanneer de diepe potentiaal 0,60 à 0,70 m -mv bedraagt en 2 à 3 uur, wanneer de diepe potentiaal 0,40 à 0,50 m -mv bedraagt, tenzij een groot gedeelte van de neerslag wordt vastgehouden ter aanvulling van een vochttekort.

De diepe afvoersnelheid kan in de periode tijdens en kort na regenval, wanneer ook ondiepe afvoer mogelijk is, niet ontleend worden aan de gemeten drainafvoer. Bij de berekening van de zaksnelheid kan de diepe afvoersnelheid voor deze periode voorlopig gelijk gesteld worden aan de waarde die bij het waargenomen potentiaalverschil tijdens het staartverloop optreedt. Uit de beschikbare gegevens over afvoersnelheden en bijbehorende potentiaalverschillen kan deze waarde worden afgeleid. Vervolgens wordt de zaksnelheid berekend en wordt met deze zaksnelheid de diepe afvoersnelheid met de niet-stationaire stromingsformule berekend. Daarna kan deze berekende waarde van de diepe afvoersnelheid toegepast worden voor een tweede berekening van de zaksnelheid. Dit kan weer leiden tot een tweede berekening van de diepe afvoersnelheid, enz. Daar de zaksnelheid tijdens de regenval, wanneer de afvoerdiepe afvoersnelheid, enz. Daar de zaksnelheid tijdens de regenval, wanneer de afvoersnelheid en het potentiaalverschil in korte tijd toenemen, voor het merendeel bepaald wordt door de geborgen hoeveelheid, is het verschil tussen de eerste en tweede berekening van de zaksnelheid doorgaans klein.

De berekening van de zaksnelheid kan worden toegelicht met een voorbeeld, dat betrekking heeft op object 1 van het drainageproefveld in de Tielerwaard bij Asperen tijdens een afvoerperiode van 22 tot 26 november 1957. In deze periode, waarin op 22 november 7,6 mm neerslag in 8 uur viel, werden de volgende waarnemingen verricht:

	0	3	6,5	25	79	98
t in uren	0	3	6,5	25	79	98
Δh_s in cm	0	12,5	21,5	12,5	3,5	2,5
a_s in mm/dag	0	6,3	6,2	2,2	0,6	0,3

In verband met de mogelijkheid van ondiepe afvoer wordt de diepe afvoersnelheid op de tijden 3 en 6,5 uur ontleend aan het verband tussen de afvoersnelheid en het potentiaalverschil tijdens het staartverloop, weergegeven in figuur 23a, en bedraagt dan respectievelijk 1,9 en 3,2 mm/dag. Voor de zaksnelheid ter plaatse van de grondwaterstand worden nu de volgende waarden berekend:

$$0-3 \text{ uur: } p = \frac{1}{24} \left(\frac{0 + 1,9}{2} \right) + \frac{1}{3} \times 0,01 \times 0,8 \times 125 = 0,04 + 0,33 = 0,37 \text{ mm/uur}$$

$$3-6,5 \text{ uur: } p = \frac{1}{24} \left(\frac{1,9 + 3,2}{2} \right) + \frac{1}{3,5} \times 0,01 \times 0,8 \times 90 = 0,11 + 0,21 = 0,32 \text{ mm/uur}$$

$$6,5-25 \text{ uur: } p = \frac{1}{24} \left(\frac{3,2 + 2,2}{2} \right) - \frac{1}{18,5} \times 0,01 \times 0,8 \times 90 = 0,11 - 0,04 = 0,07 \text{ mm/uur}$$

$$25-79 \text{ uur: } p = \frac{1}{24} \left(\frac{2,2 + 0,6}{2} \right) - \frac{1}{54} \times 0,01 \times 0,8 \times 90 = 0,055 - 0,015 = 0,04 \text{ mm/uur}$$

$$79-98 \text{ uur: } p = \frac{1}{24} \left(\frac{0,6 + 0,3}{2} \right) - \frac{1}{19} \times 0,01 \times 0,8 \times 10 = 0,02 - 0,005 = 0,015 \text{ mm/uur}$$

Daar de diepe afvoersnelheid op de tijden 3 en 6,5 uur in werkelijkheid hoger is, zal ook de zaksnelheid in de periode van 0 tot 25 uur enigszins hoger zijn. In de lange periode van 25 tot 79 uur kan een geleidelijke afname van de zaksnelheid verondersteld worden. Voor de zaksnelheid wordt derhalve van het volgende schema uitgegaan:

periode in uren:	0-6,5	6,5-25	25-49	49-73	73-98
zaksnelheid in mm/uur:	0,40	0,09	0,06	0,025	0,015

Bij toepassing van deze zakwaterstroming worden, met de niet-stationaire stromingsformule voor de diepe afvoersnelheid op de tijden 3 en 6,5 uur waarden van 3,7 en 5,5 mm/dag berekend. Een tweede berekening van de zaksnelheid ter plaatse van de grondwaterstand voor de periode van 0 tot 25 uur levert het volgende resultaat op:

$$0-3 \text{ uur: } p = \frac{1}{24} \left(\frac{0 + 3,7}{2} \right) + \frac{1}{3} \times 0,01 \times 0,8 \times 125 = 0,08 + 0,33 = 0,41 \text{ mm/uur}$$

$$3-6,5 \text{ uur: } p = \frac{1}{24} \left(\frac{3,7 + 5,5}{2} \right) + \frac{1}{3,5} \times 0,01 \times 0,8 \times 90 = 0,19 + 0,21 = 0,40 \text{ mm/uur}$$

$$6,5-25 \text{ uur: } p = \frac{1}{24} \left(\frac{5,5 + 2,2}{2} \right) - \frac{1}{18,5} \times 0,01 \times 0,8 \times 90 = 0,15 - 0,04 = 0,11 \text{ mm/uur}$$

Het verschil met de eerste berekening en het hierop gebaseerde schema van de zakwaterstroming is klein, zodat een derde berekening achterwege kan blijven. De totale hoeveelheid zakwater in 98 uren bedraagt 6,8 mm, hetgeen lager is dan de neerslag van 7,6 mm. Dit kan veroorzaakt worden door het nog niet geheel beëindigd zijn van de zakwaterstroming, het optreden van ondiepe afvoer, een vochttekort ten opzichte van het evenwichtsvochtgehalte bij het begin van de neerslagperiode, en de verdamping. Afhankelijk van deze factoren kan het verschil tussen de neerslag en de hoeveelheid zakwater ter plaatse van de grondwaterstand groter of kleiner zijn.

Ondanks het exponentiële verloop van de afvoersnelheid is ter vereenvoudiging het rekenkundig gemiddelde toegepast voor de bijdrage van de afgevoerde hoeveelheid in de berekening van de zaksnelheid. De hierdoor veroorzaakte afwijking zal gering zijn, daar tijdens de beginperiode, met de grootste verandering in de afvoersnelheid, de tijdsintervallen betrekkelijk klein zijn. Bovendien wordt in deze periode de zaksnelheid voor een groot gedeelte bepaald door de geborgen hoeveelheid en is tijdens het startverloop de kromming van het exponentiële verloop gering.

Hoewel een invloed van het neerslagverloop op de zaksnelheid mogelijk is, is hier geen rekening gehouden met het neerslagverloop en alleen met de waarnemingstijdstippen van afvoersnelheid en potentiaalverschil, daar de berekeningsmethode anders moeilijk reproduceerbaar wordt.

In figuur 22a is het neerslagverloop op 22 november 1957, volgens een zelfregistre-rende regenmeter, weergegeven, waarbij 7,6 mm in 8 uur gemeten werd d.i. gemiddeld 0,95 mm/uur. Figuur 22b heeft betrekking op het neerslagverloop van 31 oktober en

FIG. 22a. De neerslag op 22 november 1957, gemeten met een zelfregistrerende regenmeter

FIG. 22b. De neerslag op 31 oktober en 1 november 1958

FIG. 22c. De neerslag op 8 november 1958

FIG. 22d. De neerslag op 11 december 1958

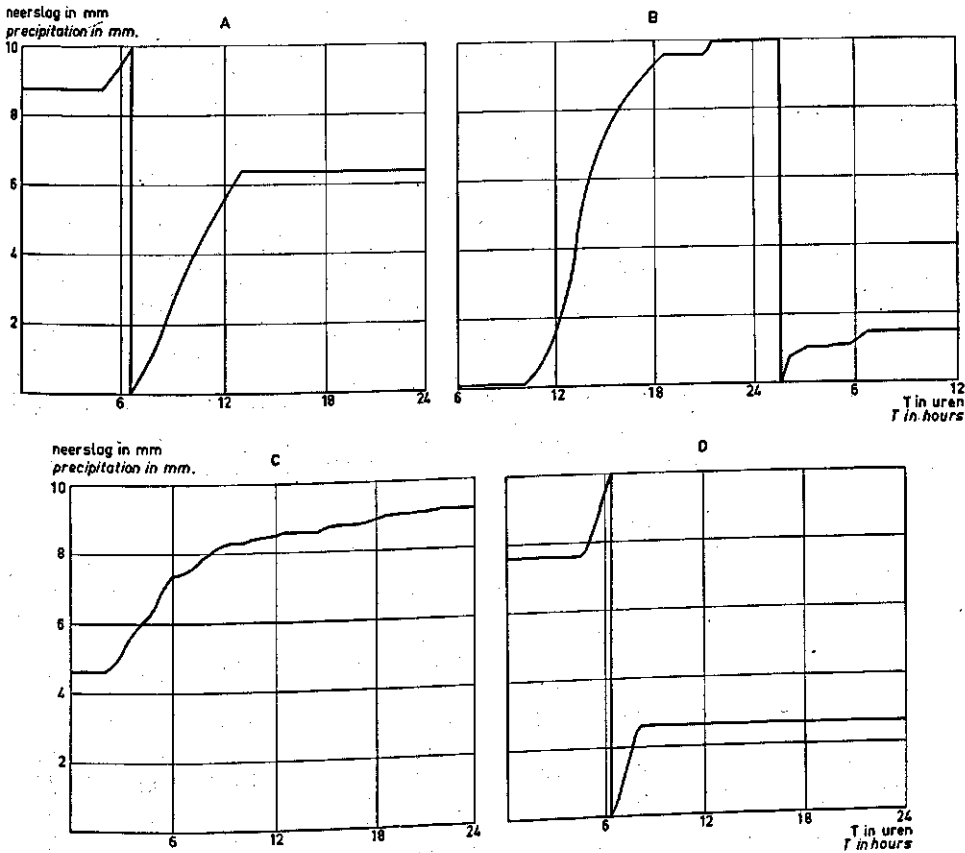


FIG. 22a. The precipitation on November 22, 1957, measured with a recording raingage

FIG. 22b. The precipitation on October 31 and November 1, 1958

FIG. 22c. The precipitation on November 8, 1958

FIG. 22d. The precipitation on December 11, 1958

1 november 1958, op welke dagen 9,5 mm neerslag viel in 8,5 uur d.i. gemiddeld 1,1 mm/uur en daarna 1,9 mm verspreid over 12 uur. Figuur 22c heeft betrekking op het neerslagverloop van 8 november 1958, waarop in totaal 4,6 mm neerslag verspreid over 20 uur viel, waarvan 2,8 mm in de eerste 4 uur d.i. gemiddeld 0,7 mm/uur. Figuur 22d heeft betrekking op het neerslagverloop van 11 december 1958, waarop 5 mm in 3,5 uur viel d.i. gemiddeld 1,4 mm/uur.

In tabel 27 is de zaksnelheid tijdens de bij bovengenoemde neerslagen behorende afvoerperioden weergegeven, die berekend werd voor drie objecten van het drainageproefveld in de Tielerwaard bij Asperen. In de vier perioden blijkt er tussen de drie

TABEL 27. De zaksnelheid in mm/uur ter plaatse van de grondwaterstand tijdens 4 afvoerperiodes op 3 objecten van het drainageproefveld in de Tielerwaard bij Asperen. De zaksnelheid is voor elk tijdsinterval berekend uit de afvoer en de geborgen of vrijgekomen hoeveelheid water in het traject van de grondwaterstandsverandering

Periode 22-26 november 1957				Periode 31 oktober-2 november 1958			
interval in uren	object			interval in uren	object		
	1	2	3		1	2	3
0 - 3	0,41	0,43	0,53	0 - 1,5	0,38	0,40	0,45
3 - 6,5	0,40	0,38	0,36	1,5- 3,5	0,39	0,40	0,41
6,5-25	0,11	0,09	0,09	3,5- 6,5	0,35	0,32	0,32
25 -79	0,04	0,04	0,04	6,5- 8,5	0,26	0,20	0,18
79 -98	0,015	0,015	0,015	8,5-22	0,16	0,12	0,12
				22 -27,5	0,10	0,08	0,08
				27,5-50,5	0,05	0,06	0,05
time interval in hours	1	2	3	time interval in hours	1	2	3
	plot				plot		
Period November 22-26, 1957				Period October 31-November 2, 1958			

Periode 8-10 november 1958				Periode 11-12 december 1958			
interval in uren	object			interval in uren	object		
	1	2	3		1	2	3
0-3	0,30	0,32	0,44	0-3	0,58	0,52	0,47
3-4	0,25	0,18	0,08	3-4	0,14	0,22	0,08
4-7	0,20	0,18	0,17	4-5	0,15	0,13	0,10
7-9	0,16	0,15	0,14	5-7	0,08	0,12	0,07
9-33	0,06	0,06	0,05	7-9	0,07	0,13	0,10
33-59	0,03	0,03	0,03	9-13	0,10	0,08	0,07
				13-28	0,05	0,06	0,05
time interval in hours	1	2	3	time interval in hours	1	2	3
	plot				plot		
Period November 8-10, 1958				Period December 11-12, 1958			

TABEL 27. The percolation rate in mm/hour at the ground-water level during 4 discharge periods on 3 plots of the drainage experimental field in the 'Tielerwaard' near Asperen. The percolation rate, calculated for each time interval, from the discharge and the quantity of stored or released water in that part of the soil profile in which the change of ground-water level has taken place

objecten een redelijke overeenstemming te zijn in de berekende zaksnelheid, die tijdens of na de neerslagperiode een min of meer geleidelijke afname vertoont. In de tweede en derde periode wordt een meer geleidelijke afname van de zaksnelheid dan in de eerste en vierde periode berekend. Dit kan een gevolg zijn van het verschillend

FIG. 23a. Verband tussen de afvoersnelheid (a) in mm/dag en het potentiaalverschil in de goed doorlatende ondergrond (Δh_3) in cm gedurende een aantal afvoerperiodes. Met de rechte lijn is het verband tijdens het staartverloop weergegeven. Het betreft het op 8,5 m afstand gedraineerde object 1 van het drainageproefveld in de Tielerswaard bij Asperen

- afvoerperiode van 22–26 november 1957
- × " " 31 oktober–2 november 1958
- Δ " " 8–10 november 1958
- + " " 11–12 december 1958
- verspreide waarnemingen

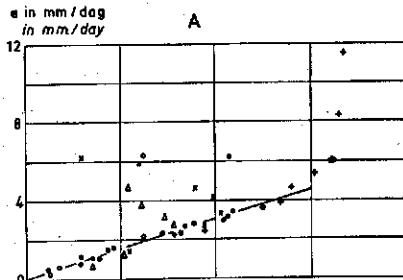


FIG. 23b. Idem. Het betreft het op 17 m afstand gedraineerde object 2 van het drainageproefveld in de Tielerswaard bij Asperen

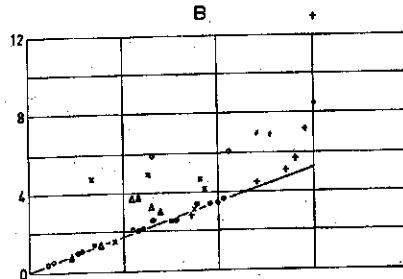


FIG. 23c. Idem. Het betreft het op 34 m afstand gedraineerde object 3 van het drainageproefveld in de Tielerswaard bij Asperen

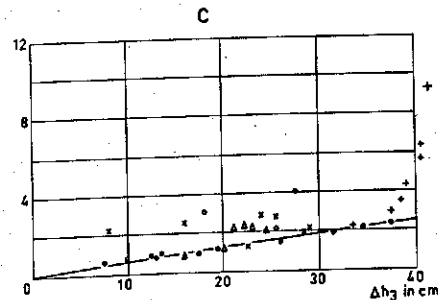


FIG. 23a. Relation of the rate of discharge (a) in mm/day and the potential difference in the high-permeable subsoil (Δh_3) in cm. during a number of discharge periods. The straight line indicates the relation during the tail recession. The observations are pertaining to plot 1 of the drainage experimental field in the 'Tielerswaard' near Asperen, with a drain spacing of 8.5 m.

- discharge period from November 22–26, 1957
- × " " " " October 31–November 2, 1958
- Δ " " " " November 8–10, 1958
- + " " " " December 11–12, 1958
- miscellaneous observations

FIG. 23b. The same as figure 23a. The observations are pertaining to plot 2 of the drainage experimental field in the 'Tielerswaard' near Asperen, with a drain spacing of 17 m.

FIG. 23c. The same as figure 23a. The observations are pertaining to plot 3 of the drainage experimental field in the 'Tielerswaard' near Asperen, with a drain spacing of 34 m.

verloop van de neerslagintensiteit, die in de tweede en derde periode tegen het einde van de regenval afneemt, maar in de eerste en vierde periode vrijwel constant blijft. Ook kan het in het geval van de eerste periode een gevolg zijn van het geringere aantal waarnemingen tijdens de periode van de potentiaalstijging, terwijl waarnemingsfouten eveneens van invloed kunnen zijn.

Met de hier gevolgde methode, die uitgaat van de veronderstelling, dat de berging in het gehele profiel plaats vindt, wordt een zakwaterstroming berekend die na het einde van de neerslagperiode snel afneemt en steeds kleiner wordt, maar eerst eindigt

met het einde van de afvoerperiode. Nu behoren de waarnemingen van bovengenoemde eerste en tweede afvoerperiode, die respectievelijk 25 en 22 uur na het begin en later werden verricht, reeds tot het staartverloop zoals uit figuur 23a, b en c blijkt. Voor de bergingscoëfficiënt van het gehele profiel werd tijdens het staartverloop een gemiddelde waarde van 0,037 op de drie objecten bepaald (paragraaf III, 4d). Uit de goede overeenstemming van deze waarde met de volgens andere bepalingen gevonden waarden kan afgeleid worden, dat het vochtgehalte in deze perioden ongeveer overeenkomt met het evenwichtsvochtgehalte. De geringe zakwaterstroming tijdens het staartverloop komt dan overeen met de hoeveelheid water die vrijkomt uit het profiel boven de grondwaterstandsverandering, wanneer het vochtgehalte gelijk blijft aan het evenwichtsvochtgehalte.

Deze methode kan alleen toegepast worden, indien men over afvoer- en grondwaterstandswaarnemingen van de betreffende periode beschikt. Bij de berekening van de afvoerperioden in hoofdstuk V is dit niet het geval. Men is dan genoodzaakt van een eenvoudiger veronderstelling uit te gaan, waarbij de bufferende werking van het profiel boven de grondwaterzone verwaarloosd wordt en de berging geheel in het traject van de grondwaterstandsverandering plaats vindt. In dat geval kan men de zaksnelheid gelijk stellen aan de neerslagintensiteit en de bergingscoëfficiënt van het gehele profiel toepassen. Wanneer de verdamping van betekenis is, kan deze in mindering gebracht worden op de neerslag.

In tegenstelling tot de eerste methode, waarin nog een geringe zakwaterstroming tot het einde van de afvoerperiode optreedt, wordt bij de tweede methode de zakwaterstroming op een zeker moment als geëindigd verondersteld, hetgeen verdisconteerd wordt in een grotere waarde voor de bergingscoëfficiënt. Theoretisch kan deze laatste situatie niet voorkomen, omdat niet een staartverloop denkbaar is met een dalende grondwaterstand, waarbij geen water uit de zone boven de grondwaterstand nazakt. In verband hiermee lijkt het juister om het staartverloop niet te definiëren als een periode die optreedt enige tijd na het einde van de zakwaterstroming, maar als een periode tijdens de daling, waarin bij benadering een constante verhouding tussen de afvoersnelheid en het potentiaalverschil bestaat.

In de volgende paragraaf zullen beide methoden worden toegepast, waarbij in het geval van de tweede methode de verdamping, die in november circa 0,15 mm/dag bedraagt, verwaarloosd zal worden.

b. De berekening van de diepe afvoersnelheid en het potentiaalverschil in de goed doorlatende ondergrond

De berekening kan geschieden met behulp van de vergelijkingen 2.12 en 2.13. Hierin wordt in plaats van de laag dikte D'_3 een equivalentlaag d toegepast, waarin de radiale weerstand is verwerkt. De waarde voor $K_3 d$ kan berekend worden uit vergelijking 2.15, wanneer het verband tussen de diepe afvoersnelheid en het potentiaalverschil in de goed doorlatende ondergrond tijdens het staartverloop is vastgesteld.

De berekening werd uitgevoerd voor vier afvoerperioden op het drainageproefveld in de Tielerwaard bij Asperen. De drie objecten van dit proefveld, die als object 1, 2 en 3 worden aangegeven, en die reeds eerder ter sprake kwamen in tabel 27 zijn ge-

draineerd op afstanden van 8,5; 17 en 34 m en op een diepte van 0,75 à 0,80 m—mv. Uit het verband tussen de diepe afvoersnelheid en het potentiaalverschil in de goed doorlatende ondergrond tijdens het staartverloop kan voor K_3d een waarde van respectievelijk 0,17; 0,78 en 1,1 m²/dag berekend worden, voor de reservoircoëfficiënt een waarde van 0,43; 0,38 en 1,06 dag bij een bergingscoëfficiënt van 0,01, de bergingscoëfficiënt voor het traject van de grondwaterstandsverandering, en een waarde van 1,5; 1,3 en 3,7 bij een bergingscoëfficiënt van 0,035, de bergingscoëfficiënt van het gehele profiel. Op grond van de in paragraaf III, 4 gevonden resultaten worden deze waarden van 0,01 en 0,035 voor de bergingscoëfficiënten toegepast. Terzijde kan hier worden opgemerkt, dat het grote verschil in K_3d -waarde tussen de objecten moet worden toegeschreven aan een verschil in doorlatendheid en niet aan de invloed van de drainafstand op de dikte van de aequivalentlaag.

Bij het begin van de afvoerperiode van 22 tot 26 november 1957 kunnen de afvoersnelheid en het potentiaalverschil op grond van de waarnemingen in de voorafgaande periode op nul gesteld worden. Daar uit tabel 27 blijkt, dat er een goede overeenstemming bestaat in de berekende zaksnelheid tussen de drie objecten, wordt van eenzelfde schema voor de zakwaterstroming uitgegaan, namelijk:

periode in uren	:	0-6,5	6,5-25	25-49	49-73	73-98
zaksnelheid in mm/uur:		0,40	0,09	0,06	0,025	0,015

De berekening van de afvoersnelheid en het potentiaalverschil is uitgevoerd zowel onder toepassing van deze geleidelijk afnemende zakwaterstroming en een bergingscoëfficiënt van 0,01, als van een zakwaterstroming die gelijk is aan het neerslagverloop, coëfficiënt van 0,01, als van een zakwaterstroming die gelijk is aan het neerslagverloop, coëfficiënt van 0,01, als van een bergingscoëfficiënt van 0,035. In tabel 28a namelijk 8 uur maal 0,95 mm/uur, en een bergingscoëfficiënt van 0,035. In tabel 28a zijn de waarnemingen en de resultaten van beide berekeningen samengevat.

De berekening van de afvoersnelheid en het potentiaalverschil kan met het volgende voorbeeld, dat betrekking heeft op object 1, waarvan de reservoircoëfficiënt j 0,43 dag bedraagt en de waarde $l^2/8K_3d$ 53 dag, worden toegelicht.

Op het tijdstip $t = 3$ uur = 0,125 dag bedraagt het quotiënt b/j 0,29, waarbij volgens bijlage 2: $c_1 = 0,39$ en $c_2 = 0,23$.

$$a_3 = 0,39 \times 24 \times 0,40 = 3,7 \text{ mm/dag}$$

$$\Delta h_3 = 0,23 \times 53 \times 24 \times 0,40 = 117 \text{ mm}$$

Op het tijdstip 25 uur bedraagt het quotiënt b/j van de eerste periode van de zakwaterstroming 2,4, waarbij $c_1 = 0,927$ en $c_2 = 0,906$.

Het quotiënt b/j van de tweede periode van de zakwaterstroming, die na 6,5 uur begint, bedraagt 1,8, waarbij $c_1 = 0,866$ en $c_2 = 0,83$.

$$a_3 = (0,927 - 0,866) \times 24 \times 0,40 + 0,866 \times 24 \times 0,09 = 2,3 \text{ mm/dag}$$

$$\Delta h_3 = (0,906 - 0,83) \times 53 \times 24 \times 0,40 + 0,83 \times 53 \times 24 \times 0,09 = 130 \text{ mm}$$

Ook bij het begin van de tweede afvoerperiode van 31 oktober tot 2 november 1958 kunnen de afvoersnelheid en het potentiaalverschil op grond van de waarnemingen in de voorafgaande periode op nul gesteld worden. Bij de drie objecten wordt weer van eenzelfde schema voor de zakwaterstroming uitgegaan, namelijk:

periode in uren	:	0-3,5	3,5-6,5	6,5-8,5	8,5-22	22-27,5	27,5-50,5
zaksnelheid in mm/uur:		0,40	0,30	0,20	0,125	0,08	0,05

TABEL 28a. De waarnemingen van de afvoersnelheid (a) in mm/dag en het potentiaalverschil in de goed doorlatende ondergrond (Δh_s) in cm en de waarden berekend met de niet-stationaire stromingsvergelijkingen 2.12 en 2.13, tijdens een afvoerperiode van 22 tot 26 november 1957. De berekening is uitgevoerd zowel onder toepassing van een geleidelijk afnemende zakwaterstroming gebaseerd op tabel 27 en een bergingscoëfficiënt van 0,01, als van een zakwaterstroming die gelijk is aan het neerslagverloop, namelijk 8 maal 0,95 mm/uur, en een bergingscoëfficiënt van 0,035

Object	Tijd in uren	Waargenomen		Berekend ($\mu = 0,01$)		Berekend ($\mu = 0,035$)	
		a	Δh_s	a_s	Δh_s	a_s	Δh_s
1	3	6,3	12,5	3,7	11,5	4,6	8,5
	6,5	6,2	21,5	5,5	23	6,9	18,5
	25	2,2	12,5	2,3	13	2,3	14,5
	79	0,6	3,5	0,5	3	0,5	3
	98	0,3	2,5	0,3	2	0,3	2
2	3	5,9	13	3,9	11,5	5,0	8,5
	6,5	6,0	21	5,6	22	7,3	18
	25	2,1	11	2,3	11,5	2,3	12,5
	79	0,5	2,5	0,5	2,5	0,4	2,5
	98	0,3	2	0,3	2	0,3	1,5
3	3	3,1	18	2,4	12,5	3,0	9
	6,5	4,1	27,5	3,6	26	4,6	21
	25	2,2	25,5	2,2	27	2,0	24
	79	0,8	10	0,8	11,5	0,7	11
	98	0,6	7,5	0,6	8,5	0,6	9
Plot	Time in hours	a	Δh_s	a_s	Δh_s	a_s	Δh_s
		Observed		Calculated ($\mu = 0.01$)		Calculated ($\mu = 0.035$)	

TABLE 28a. The data of the rate of discharge (a) in mm/day and the potential difference in the high-permeable subsoil (Δh_s) in cm. and the values calculated with equations 2.12 and 2.13 for non-steady state ground-water flow, during a discharge period from November 22 to 26, 1957. The calculation has been made applying a gradually decreasing percolation rate based on table 27 and a storage coefficient of 0.01, as well as a percolation rate equal to the precipitation rate, being 8 times 0.95 mm/hour, and a storage coefficient of 0.035

De berekening van de afvoersnelheid en het potentiaalverschil is uitgevoerd zowel onder toepassing van deze geleidelijk afnemende zakwaterstroming en een bergingscoëfficiënt van 0,01, als van een zakwaterstroming die gelijk is aan het neerslagverloop namelijk 8,5 uur maal 1,1 mm/uur en 12 uur maal 0,16 mm/uur, en een bergingscoëfficiënt van 0,035. In tabel 28b zijn de waarnemingen en de resultaten van de berekeningen samengevat.

Bij het begin van de derde en vierde afvoerperiode hadden de afvoersnelheid en het potentiaalverschil nog een zekere restwaarde ten gevolge van een vorige regenperiode, waarvan de zakwaterstroming niet meer kon worden afgeleid. De bijdrage van de vorige periode in de afvoersnelheid en het potentiaalverschil op verschillende tijdstippen kan nu bepaald worden door op de restwaarden het verband van de afvoer-

TABEL 28b. Als tabel 28a, tijdens een afvoerperiode van 31 oktober tot 2 november 1958. De berekening is uitgevoerd zowel onder toepassing van een geleidelijk afnemende zakwaterstroming gebaseerd op tabel 27 en een bergingscoëfficiënt van 0,01, als van een zakwaterstroming die gelijk is aan het neerslagverloop, namelijk 8,5 maal 1,1 mm/uur en 12 maal 0,16 mm/uur, en een bergingscoëfficiënt van 0,035

Object	Tijd in uren	Waargenomen		Berekend ($\mu = 0,01$)		Berekend ($\mu = 0,035$)	
		a	Δh_3	a_3	Δh_3	a_3	Δh_3
1	1,5	6,2	6	2,7	6	3,7	5
	3,5	5,9	12	4,1	13	5,8	11
	6,5	4,6	18	4,6	19,5	7,9	19,5
	8,5	4,2	20	4,1	21	8,9	25
	22	3,3	20,5	3,3	18	3,9	24,5
	27,5	2,7	19	2,6	15	3,3	21
	50,5	1,4	11	1,3	8	1,7	11
2	1,5	4,7	6,5	2,8	6	4,2	5
	3,5	4,9	12,5	4,3	13	6,0	11
	6,5	4,6	18	4,6	18,5	8,4	19
	8,5	4,1	18,5	4,2	20	9,7	25
	22	3,1	17,5	3,1	15,5	3,9	22,5
	27,5	2,5	15	2,4	13	3,2	19,5
	50,5	1,5	9	1,3	6,5	1,6	9
3	1,5	2,3	8	1,7	6,5	2,6	5,5
	3,5	2,6	16	2,5	14	3,7	12
	6,5	2,9	24	2,9	22	5,0	20,5
	8,5	2,8	25,5	2,7	25,5	5,8	27,5
	22	2,2	29	2,5	32	2,7	32
	27,5	2,0	28,5	2,2	29	2,3	28,5
	50,5	1,3	22,5	1,5	22,5	1,4	24,5
Plot	Time in hours	a	Δh_3	a_3	Δh_3	a_3	Δh_3
		Observed		Calculated ($\mu = 0.01$)		Calculated ($\mu = 0.035$)	

TABEL 28b. The same as table 28a, during a discharge period from October 31 to November 2, 1958. The calculation has been made applying a gradually decreasing percolation rate based on table 27 and a storage coefficient of 0.01, as well as a percolation rate equal to the precipitation rate, being 8.5 times 1.1 mm/hour and 12 times 0.16 mm/hour, and a storage coefficient of 0.035

snelheid en het potentiaalverschil met de tijd gedurende het staartverloop toe te passen. De zaksnelheid ten gevolge van de nieuwe neerslagperiode, weergegeven in tabel 27, werd berekend, nadat de waarnemingen verminderd waren met de restwaarden van de vorige periode op verschillende tijdstippen.

Bij het begin van de derde afvoerperiode van 8 tot 10 november 1958 bedroeg op de objecten 1, 2 en 3 de afvoersnelheid respectievelijk 0,3; 0,3 en 0,4 mm/dag en het potentiaalverschil 2; 1,5 en 7 cm. De zakwaterstroming wordt voor de drie objecten als volgt geschematiseerd:

TABEL 28c. Als tabel 28a, tijdens een afvoerperiode van 8 tot 10 november 1958. De berekening is uitgevoerd zowel onder toepassing van een geleidelijk afnemende zakwaterstroming gebaseerd op tabel 27 en een bergingscoëfficiënt van 0,01, als van een zakwaterstroming die gelijk is aan het neerslagverloop, namelijk 4 maal 0,7 mm/uur, 3 maal 0,3 mm/uur en 13 maal 0,07 mm/uur, en een bergingscoëfficiënt van 0,035

Object	Tijd in uren	Waargenomen		Berekend ($\mu = 0,01$)		Berekend ($\mu = 0,035$)	
		a	Δh_3	a_3	Δh_3	a_3	Δh_3
1	3	4,7	11	3,1	11	3,8	8,5
	4	3,8	12,5	3,5	13	4,3	10
	7	3,2	15	3,1	15,5	3,5	13
	9	2,8	16	3,0	16,5	2,8	13
	33	1,4	11	1,4	8,5	1,4	9
	59	0,8	7,5	0,8	4,5	0,7	5
2	3	3,7	11	3,3	10	4,2	8
	4	3,7	11,5	3,7	12,5	4,6	10,5
	7	3,3	13	3,2	14	3,7	12
	9	3,0	14	3,0	15	3,0	12,5
	33	1,4	7,5	1,3	7	1,3	8
	59	0,8	4,5	0,7	4	0,6	4
3	3	2,3	21	2,2	16,5	2,6	13,5
	4	2,4	21	2,4	19,5	3,1	16
	7	2,3	23	2,1	22	2,5	17,5
	9	2,1	24,5	2,2	24,5	2,0	18
	33	1,2	20	1,5	21	1,1	18,5
	59	0,9	16	0,9	15	0,7	12,5
Plot	Time in hours	a	Δh_3	a_3	Δh_3	a_3	Δh_3
		Observed		Calculated ($\mu = 0,01$)		Calculated ($\mu = 0,035$)	

TABEL 28c. The same as table 28a, during a discharge period from November 8 to 10, 1958. The calculation has been made applying a gradually decreasing, percolation rate based on table 27 and a storage coefficient of 0.01, as well as a percolation rate equal to the precipitation rate, being 4 times 0.7 mm/hour, 3 times 0.3 mm/hour and 13 times 0.07 mm/hour, and a storage coefficient of 0.035

periode in uren :	0-4	4-9	9-33	33-59
zaksnelheid in mm/uur:	0,30	0,15	0,05	0,03

De berekening van de afvoersnelheid en het potentiaalverschil is uitgevoerd zowel onder toepassing van deze zakwaterstroming en een bergingscoëfficiënt van 0,01, als van een zakwaterstroming die gelijk is aan het neerslagverloop, namelijk 4 uur maal 0,7 mm/uur, 3 uur maal 0,3 mm/uur en 13 uur maal 0,07 mm/uur, en een bergingscoëfficiënt van 0,035. In tabel 28c zijn de resultaten van de berekening samengevat.

De berekening van de afvoersnelheid en het potentiaalverschil in dit geval kan met het volgende voorbeeld worden toegelicht, dat betrekking heeft op object 1.

De reservoircoëfficiënt j bedraagt 0,43 dag bij een bergingscoëfficiënt van 0,01 en 1,5 dag bij een bergingscoëfficiënt van 0,035, terwijl de waarde $l^2/8K_d$ 53 dag bedraagt. De cotangens van de lijn,

TABEL 28d. Als tabel 28a, tijdens een afvoerperiode van 11 en 12 december 1958. De berekening is uitgevoerd zowel onder toepassing van een geleidelijk afnemende zakwaterstroming gebaseerd op tabel 27 en een bergingscoëfficiënt van 0,01, als van een zakwaterstroming die gelijk is aan het neerslagverloop, namelijk 3,5 maal 1,4 mm/uur, en een bergingscoëfficiënt van 0,035

Object	Tijd in uren	Waargenomen		Berekend ($\mu = 0,01$)		Berekend ($\mu = 0,035$)	
		a	Δh_s	a_s	Δh_s	a_s	Δh_s
1	3	20,6	34,5	7,4	33	9,3	29,5
	4	11,6	33,5	5,7	33,5	7,9	31,0
	5	8,4	33	5,4	34	6,4	30,5
	7	5,4	30,5	5,0	32	5,3	29,5
	9	4,7	28	4,8	30	4,9	28,5
	13	3,9	27	4,3	29	4,0	26
	28	2,4	19	2,6	18	2,5	18,5
2	3	13,0	30	7,9	31	10,3	28
	4	8,5	30	6,3	31	8,5	29
	5	7,2	29	5,9	30	6,8	28,5
	7	5,7	28	5,4	28,5	5,9	28
	9	5,1	27	5,1	27	5,2	27
	13	4,5	24	4,6	24	4,3	24,5
	28	2,8	17	2,8	15	2,7	15,5
3	3	9,3	42	5,3	44	6,4	40
	4	6,4	40,5	4,4	44	6,1	41,5
	5	5,7	40,5	4,0	44	4,6	41,5
	7	4,4	39	3,7	42,5	3,9	40,5
	9	3,6	38,5	3,8	42,5	3,5	37
	13	3,0	37,5	3,4	43	3,0	36
	28	2,3	33,5	2,4	35	2,2	31
Plot	Time in hours	a	Δh_s	a_s	Δh_s	a_s	Δh_s
		Observed		Calculated ($\mu = 0.01$)		Calculated ($\mu = 0.035$)	

TABLE 28d. The same as table 28a, during a discharge period from December 11 to 12, 1958. The calculation has been made applying a gradually decreasing percolation rate based on table 27 and a storage coefficient of 0.01, as well as a percolation rate equal to the precipitation rate, being 3.5 times 1.4 mm/hour, and a storage coefficient of 0.035

die op halflogaritmisch papier (zie als voorbeeld hiervan figuur 7 en 21) het verband van de afvoersnelheid en het potentiaalverschil met de tijd weergeeft, bedraagt $2,303 \times 1,5 = 3,5$.

Uit de restwaarden van 0,3 mm/dag en 2 cm bij het begin van de afvoerperiode en de lijn met een cotangens van 3,5 kunnen op het tijdstip 9 uur een afvoersnelheid van 0,2 mm/dag en een potentiaalverschil van 1,5 cm worden afgeleid. Op dat tijdstip bedraagt het quotiënt b/j van de eerste periode van de zakwaterstroming 0,87, waarbij $c_1 = 0,66$ en $c_2 = 0,57$, en het quotiënt b/j van de tweede periode van de zakwaterstroming 0,49, waarbij $c_1 = 0,50$ en $c_2 = 0,37$.

$$a_s = 0,2 + (0,66 - 0,50) \times 24 \times 0,3 + 0,50 \times 24 \times 0,15 = 2,8 \text{ mm/dag}$$

$$\Delta h_s = 15 + (0,57 - 0,37) \times 53 \times 24 \times 0,3 + 0,37 \times 53 \times 24 \times 0,15 = 160 \text{ mm}$$

Bij het begin van de vierde afvoerperiode van 11 tot 12 december 1958 bedroeg op de objecten 1, 2 en 3 de afvoersnelheid respectievelijk 2,3; 2,7 en 2,1 mm/dag en het

potentiaalverschil 18, 16 en 28 cm. De zakwaterstroming wordt op de volgende wijze geschematiseerd:

periode in uren	:	0-3	3-13	13-28
zaksnelheid in mm/uur:		0,55	0,10	0,05

De berekening van de afvoersnelheid en het potentiaalverschil is uitgevoerd zowel onder toepassing van deze zakwaterstroming en een bergingscoëfficiënt van 0,01 als van een zakwaterstroming die gelijk is aan het neerslagverloop, namelijk 3,5 uur maal 1,4 mm/uur, en een bergingscoëfficiënt van 0,035. In tabel 28d zijn de resultaten van de berekening samengevat.

c. Vergelijking van de waarnemingen met de berekende waarden

Uit tabel 28a blijkt, dat de waarden van het potentiaalverschil, berekend onder toepassing van een geleidelijk afnemende zakwaterstroming en een bergingscoëfficiënt van 0,01 in het algemeen goed overeenstemmen met de waarnemingen. Wat de afvoersnelheid betreft, de berekende waarden op de tijden 3 en 6,5 uur zijn lager dan de waarnemingen, maar beiden stemmen op latere tijdstippen goed overeen. De waarden van het potentiaalverschil, berekend onder toepassing van een zakwaterstroming die gelijk is aan het neerslagverloop en een bergingscoëfficiënt van 0,035, zijn op de tijdstippen 3 en 6,5 uur enigszins lager dan bij de eerste berekening, terwijl de afvoersnelheid op deze tijden hoger is en op 6,5 uur zelfs groter dan de waarneming. Op de latere tijdstippen gedurende het staartverloop bestaat er een goede overeenstemming.

Uit tabel 28b blijkt, dat ook nu de waarden van het potentiaalverschil, berekend onder toepassing van een geleidelijk afnemende zakwaterstroming en een bergingscoëfficiënt van 0,01, goed overeenstemmen met de waarnemingen. De berekende waarden van de afvoersnelheid zijn op de tijden 1,5 en 3,5 uur weer lager dan de waarnemingen, maar beiden komen daarna goed overeen. De waarden van het potentiaalverschil, berekend onder toepassing van een zakwaterstroming die gelijk is aan het neerslagverloop en een bergingscoëfficiënt van 0,035, wijken enigszins meer af van de waarnemingen, terwijl de berekende afvoersnelheid vrijwel steeds groter is dan de waargenomen waarde.

In tabel 28c blijken eveneens de waarden van het potentiaalverschil, berekend onder toepassing van een geleidelijk afnemende zakwaterstroming en een bergingscoëfficiënt van 0,01, goed overeen te stemmen met de waarnemingen. De berekende waarden van de afvoersnelheid zijn alleen op het tijdstip 3 uur lager dan de waarnemingen en vertonen daarna een goede overeenkomst. De waarden van het potentiaalverschil, berekend onder toepassing van een zakwaterstroming die gelijk is aan het neerslagverloop en een bergingscoëfficiënt van 0,035, zijn in de periode van 3 tot 9 uur enigszins lager dan bij de eerste berekening, terwijl de afvoersnelheid wat hoger is en op het tijdstip 3 en 4 uur groter dan de waarneming.

Uit tabel 28d blijkt, dat de waarden van het potentiaalverschil volgens beide berekeningen goed overeenstemmen met de waarnemingen. Op de tijden 3, 4, 5 en 7 uur zijn de berekende waarden van de afvoersnelheid steeds lager dan de waarnemingen, waarbij de berekening onder toepassing van een geleidelijk afnemende zakwaterstro-

ming en een bergingscoëfficiënt van 0,01, de laagste waarden oplevert. Daarna bestaat er weer een goede overeenstemming.

De berekening van een afvoersnelheid die hoger is dan de waarneming, hetgeen bij toepassing van een zakwaterstroming die gelijk is aan het neerslagverloop en een bergingscoëfficiënt van 0,035 voorkomt, kan verklaard worden doordat bij de berekening van een te hoge zaksnelheid wordt uitgegaan, die onvoldoende gecompenseerd wordt door een hogere bergingscoëfficiënt, en van een te grote hoeveelheid zakwater. Dit kan veroorzaakt worden, doordat een gedeelte van de neerslag als ondiepe afvoer tot afstroming komt, verdampt, of dient ter aanvulling van een vochttekort in het profiel. Hoewel de bij deze factoren betrokken hoeveelheden betrekkelijk gering zijn – de ondiepe afvoer wordt in tabel 29 doorgaans op minder dan 0,5 mm becijferd, de verdamping bedraagt in november ongeveer 0,15 mm/dag, terwijl ook een vochttekort van 1 à 2 mm geen afwijking van betekenis ten opzichte van het evenwichtsgedrag genoeemd kan worden – kan hun totale hoeveelheid water wel van belang zijn en kan hierdoor een zeker verschil ontstaan tussen de hoeveelheid neerslag en de hoeveelheid zakwater. Naarmate de veronderstelling dat de hoeveelheid zakwater gelijk is aan de neerslag beter benaderd wordt, zal het verschil tussen beide berekeningsmethoden en de waarneming geringer zijn.

Dat bij toepassing van een zakwaterstroming die gelijk is aan het neerslagverloop en een bergingscoëfficiënt van 0,035, een te hoge zaksnelheid onvoldoende gecompenseerd wordt door een hogere waarde van de bergingscoëfficiënt, kan met de volgende berekening toegelicht worden. Bij een bergingscoëfficiënt van 0,035 is de reservoircoëfficiënt 3,5 maal zo groot als bij een bergingscoëfficiënt van 0,01, b.v. 2,5 dag in plaats van 0,71 dag, zodat na een periode van 8 uur de coëfficiënt c_1 0,49 bedraagt in plaats van 0,26 en de coëfficiënt c_2 0,35 in plaats van 0,105. De zaksnelheid kan tijdens de neerslag op grond van een vergelijking tussen de neerslagintensiteit en de berekende zaksnelheid in tabel 27 op 2,5 maal de berekende zaksnelheid gesteld worden.

Bij toepassing van een bergingscoëfficiënt van 0,035 wordt derhalve na een periode van 8 uur een afvoersnelheid berekend, die $0,26/0,49 \times 2,5 = 1,33$ maal te hoog is en een potentiaalverschil dat $0,105/0,35 \times 2,5 = 0,83$ maal te laag is als bij toepassing van een bergingscoëfficiënt van 0,01. Na een periode van 1 dag wordt de afvoersnelheid 1,4 maal te hoog en het potentiaalverschil 1,02 maal te hoog berekend. Na het einde van een periode met eenzelfde zaksnelheid, treedt voor de bijdrage van deze periode het omgekeerde effect op. Wanneer de neerslagperiode is opgebouwd uit meerdere dagen, zoals in hoofdstuk V besproken wordt, zullen deze fouten elkaar vrijwel compenseren.

De berekende afvoersnelheid bij toepassing van een geleidelijk afnemende zakwaterstroming en een bergingscoëfficiënt van 0,01, is tijdens de eerste uren van de afvoerperiode steeds lager dan de waargenomen waarde en wel meer, naarmate de drainafstand kleiner is. Dit kan niet verklaard worden doordat van een te lage waarde voor de zaksnelheid wordt uitgegaan. Immers, volgens de vergelijkingen 2.12 en 2.13 zijn zowel de afvoersnelheid als het potentiaalverschil afhankelijk van de zaksnelheid en komen de waargenomen en berekende waarden van het potentiaalverschil goed overeen. Bovendien komen ook de waargenomen en berekende waarden van de afvoersnelheid op latere tijdstippen, die nog beïnvloed worden door de zaksnelheid in de eerste periode, goed overeen.

Dit verschil tussen de waargenomen afvoersnelheid en de berekende waarde van de diepe afvoersnelheid kan veroorzaakt worden door de afvoer van de ter plaatse van de drainsleuf gevallen neerslag en door het optreden van ondiepe afvoer. Wat de

eerste mogelijkheid betreft zou men de zaksnelheid ter plaatse van de drainsleuf in verband met een grotere doorlatendheid maximaal gelijk kunnen stellen aan de neerslagintensiteit. Bij een sleufbreedte van 0,5 m en een neerslagintensiteit van 1 mm/uur, d.w.z. 24 mm/dag, wordt de afvoersnelheid, berekend over een oppervlakte met drainafstanden van 8,5; 17 en 34 m, tijdens de neerslag vergroot met 0,5/8,5 of 0,5/17 of 0,5/34 maal 24 = resp. 1,4 en 0,7 en 0,4 mm/dag.

Daar de eerste mogelijkheid geen volledige verklaring voor het verschil kan geven, moet dit mede veroorzaakt worden door de ondiepe afvoer. De ondiepe afvoer kan niet het gevolg zijn van een stijging van de grondwaterstand tot de bovenkant van de slecht doorlatende laag en een daardoor veroorzaakte geringe indringingssnelheid. Immers, het grootste diepe potentiaalverschil bedraagt circa 40 cm op object 3 tijdens de vierde afvoerperiode, hetgeen bij een draindiepte van 80 cm en rekening houdende met het potentiaalverschil in de slecht doorlatende laag, nog een grondwaterstand van ongeveer 35 cm -mv betekent. De ondiepe afvoer moet derhalve een gevolg zijn van de verhouding tussen de regenintensiteit, waarvan de hoogste waarde tijdens deze afvoerperiodes varieerde van 0,7 tot 1,4 mm/uur, en de doorlaatfactor van de slecht doorlatende laag. Voor de doorlaatfactor van de slecht doorlatende laag werd in september 1958 en maart 1959 vrijwel dezelfde waarde bepaald, namelijk 0,046 en 0,048 m/dag, d.i. 1,9 en 2 mm/uur, derhalve hogere waarden dan de bovengenoemde regenintensiteiten. Het optreden van ondiepe afvoer kan verklaard worden, doordat de doorlaatfactor gedurende de onderzochte perioden lager was, doordat de regenintensiteit tijdelijk hoger was dan de gemiddelde waarde (zie figuur 22) of door het optreden van luchtinsluiting, waardoor de indringingssnelheid kleiner wordt. Dat het verschil tussen de waargenomen en berekende afvoersnelheid het kleinste is tijdens de derde afvoerperiode en het grootste is tijdens de vierde afvoerperiode, is in overeenstemming met de gemiddelde neerslagintensiteit in deze perioden. Evenals bij de bepaling van de doorlaatfactor van de zodelaag door infiltratie met een sleuf, werden bij het optreden van ondiepe afvoer waterstanden in de zodelaag gemeten.

TABEL 29. De ondiepe afvoer in mm gedurende 4 afvoerperiodes, berekend uit het verschil tussen de waargenomen afvoersnelheid en de waarde van de diepe afvoersnelheid, die berekend werd onder toepassing van een geleidelijk afnemende zakwaterstroming en een bergingscoëfficiënt van 0,01

Periode	Object 1	Object 2	Object 3
22-26 november 1957	0,4		
31 oktober-2 november 1958	0,45	0,3	0,15
8-10 november 1958	0,15	0,2	0,05
11-12 december 1958	1,5	0,05	0,01
		0,6	0,5
Period	Plot 1	Plot 2	Plot 3

TABEL 29. The shallow discharge in mm. during 4 discharge periods, calculated from the difference between the observed value of the rate of discharge and the calculated value of the rate of deep discharge, applying a gradually decreasing percolation rate and a storage coefficient of 0.01

Wanneer de ondiepe afvoersnelheid gelijk gesteld wordt aan het verschil tussen de waargenomen afvoersnelheid en de waarde berekend onder toepassing van een gelijkelijk afnemende zakwaterstroming en een bergingscoëfficiënt van 0,01, kan de ondiepe afvoer, waarin ook de sleufafvoer begrepen wordt, berekend worden. In tabel 29 is het resultaat van deze berekening samengevat. Hoewel de ondiepe afvoersnelheid tijdelijk groot kan zijn, is de betekenis van de ondiepe afvoer op gedraineerde percelen doorgaans voor de totale afvoer niet groot in verband met de korte tijdsduur, die reeds uit tabel 28 a, b, c en d blijkt. Tijdens de eerste drie afvoerperioden bedraagt de ondiepe afvoer minder dan 5% van de neerslag, terwijl deze tijdens de vierde afvoerperiode op de objecten 2 en 3 circa 10% en op object 1: 30% van de neerslag bedraagt. Een uitzondering vormt de afvoer gedurende perioden met dooiende sneeuw, in het bijzonder wanneer dit gepaard gaat met regenval of indien dit plaats vindt op bevroren grond. Onder dergelijke omstandigheden werden op het drainageproefveld in de Tielerswaard bij Asperen zeer hoge afvoersnelheden van 40 tot 60 mm/dag gemeten, die na enige uren gedaald waren tot ongeveer 10 mm/dag, en dan maakt ook de ondiepe afvoer een groter gedeelte van de totale afvoer uit.

2. HET AFVOERPROCES IN HET GEVAL VAN BEGREPPELING

Op begreppelde percelen vindt zowel ondiepe afvoer naar de greppels als diepe afvoer naar de sloten plaats. De onderlinge verhouding wordt bepaald door de regenintensiteit, de doorlaatfactor en de dikte van de slecht doorlatende laag, en de potentiaal in de goed doorlatende ondergrond. De verhouding van de factoren waarvan de diepe potentiaal afhankelijk is, namelijk het slootpeil, de slootafstand, de ligging van de sloten ten opzichte van de goed doorlatende ondergrond en de *KD*-waarde van deze laag, zal op begreppelde percelen in het algemeen zodanig zijn, dat de diepe afvoersnelheid niet groter is dan 1 à 2 mm/dag wanneer de grondwaterstand gestegen is tot de onderkant van de zodelaag, zoals uit het volgende hoofdstuk zal blijken. Hierdoor zal de afvoer overwegend als ondiepe afvoer naar de greppels plaats vinden.

Het is niet mogelijk het verloop van de ondiepe afvoersnelheid en grondwaterstand tijdens een afvoerperiode te berekenen op dezelfde wijze als bij de diepe afvoer. Hiervoor ontbreken vergelijkingen in de vorm van 2.12 en 2.13, daar de dikte van de doorstroomde laag niet constant is. Bovendien is de doorlaatfactor van de zodelaag niet constant, daar deze met de diepte onder maaiveld afneemt. Wel is het mogelijk de ondiepe afvoersnelheid bij opeenvolgende grondwaterstanden te berekenen met vergelijking 2.22, wanneer verondersteld wordt dat de ondiepe grondwaterstand zich op eenzelfde hoogte boven de slecht doorlatende laag bevindt over de gehele afstand tussen de greppels.

Onder toepassing van vergelijking 2.22, van de in tabel 15 vermelde doorlaatfactoren van de zodelaag en voor een afstand van 10 m, is de ondiepe afvoersnelheid berekend in tabel 30a. De maximale ondiepe afvoersnelheid bedraagt dan 14 mm/dag, terwijl een berekening met de vergelijking 2.21 een waarde van minder dan 1 mm/dag oplevert. De ondiepe afvoersnelheid kan nog aanmerkelijk groter worden indien de doorlaatfactor van de bovenste centimeters van de zodelaag groter is dan uit de

TABEL 30a. De ondiepe afvoersnelheid, berekend met vergelijking 2.22, bij verschillende waarden van de ondiepe grondwaterstand boven de slecht doorlatende laag en een afstand van 10 m tussen de open watergangen. De doorlaatfactoren zijn berekend uit de in tabel 16 vermelde waarden

Laag in m -mv	K in m/dag	Δh_1 in m	a_1 in mm/dag
0,00-0,20	0,46	0,20	14
0,05-0,20	0,30	0,15	6,5
0,10-0,20	0,20	0,10	3
0,15-0,20	0,17	0,05	1
<i>Layer in m. below surface</i>	<i>K in m/day</i>	<i>Δh_1 in m.</i>	<i>a_1 in mm/day</i>

TABEL 30a. The rate of shallow discharge, calculated with equation 2.22, for different values of the water table in the surface layer above the low-permeable layer and a drain spacing of 10 m. The values of the hydraulic conductivity have been calculated from the values mentioned in table 16

bepaling blijkt, hetgeen waarschijnlijk het geval is. In tabel 30b is de ondiepe afvoersnelheid opnieuw berekend, waarbij aangenomen is dat de doorlaatfactor ook in de bovenste 5 cm afneemt en per cm vanaf het maaiveld respectievelijk 5, 4, 3, 2 en 1 m/dag bedraagt.

Uit tabel 30a en b blijkt derhalve, dat bij toepassing van de niet-stationaire stromingsvergelijking 2.22 zeer hoge afvoersnelheden berekend kunnen worden, in het bijzonder wanneer de doorlaatfactor van de bovenste centimeters van de zodelaag enige m/dag bedraagt en de stroming hierin plaats vindt. Er werden geen aaneengesloten series greppelafvoermetingen tijdens één afvoerperiode, maar wel incidentele metingen tijdens verschillende perioden verricht. In overeenstemming met het bovenstaande bleek hieruit dat bij grote afvoersnelheden, de waterstanden in ondiepe buizen in de zodelaag vrijwel gelijk stonden met het maaiveld over de gehele afstand, terwijl bij waterstanden tussen 0,10 en 0,20 m -mv vrijwel geen afvoer meer plaats vond.

TABEL 30b. Idem, wanneer aangenomen wordt dat de doorlaatfactor ook in de bovenste 5 cm afneemt en daar per cm vanaf het maaiveld respectievelijk 5, 4, 3, 2 en 1 m/dag bedraagt

Laag in m -mv	K in m/dag	Δh_1 in m	a_1 in mm/dag
0,00-0,20	0,97	0,20	29
0,01-0,20	0,76	0,19	21,5
0,02-0,20	0,58	0,18	15,5
0,03-0,20	0,43	0,17	11
0,04-0,20	0,34	0,16	8
0,05-0,20	0,30	0,15	6,5
0,10-0,20	0,20	0,10	3
0,15-0,20	0,17	0,05	1
<i>Layer in m. below surface</i>	<i>K in m/day</i>	<i>Δh_1 in m.</i>	<i>a_1 in mm/day</i>

TABEL 30b. The same as table 30a, assuming the hydraulic conductivity is also decreasing in the top 5 cm. and is there amounting to 5, 4, 3, 2 and 1 m/day per cm. below surface

Tevens blijkt uit tabel 30, dat voor het optreden van deze hoge waarden van de ondiepe afvoersnelheid een ronde ligging van het maaiveld tussen de greppels niet noodzakelijk is. Dit is in overeenstemming met de waarnemingen, zowel op gedraineerde, als begreppelde percelen heringezaaid grasland, waar het maaiveld min of meer vlak ligt en geen ronding tussen de drains en greppels aanwezig is. Op dergelijke percelen werden tijdens sommige regenperioden zeer hoge afvoersnelheden gemeten, die slechts door het optreden van ondiepe afvoer verklaard konden worden.

Wel kan in het geval van begreppeling een ronde ligging tussen de greppels nuttig zijn uit praktische overwegingen ter voorkoming van waterstagnatie op lage plekken, daar een geheel vlakke ligging van het maaiveld doorgaans bij egalisatie niet bereikt wordt en de indringingssnelheid in de slecht doorlatende laag op begreppelde percelen in het algemeen gering is. Op gedraineerde percelen is dit niet noodzakelijk in verband met de grotere indringingssnelheid in de slecht doorlatende laag door de lagere potentiaal in de goed doorlatende ondergrond.

Wanneer door één van de in paragraaf III, 3b genoemde oorzaken de doorlaatfactor van de zodelaag zeer klein geworden is, kan oppervlakte afvoer over het maaiveld optreden. In dat geval zou op ge-draineerde percelen een ronde maaiveldsligging tussen de drains wellicht een mindere mate van plas-vorming ten gevolge kunnen hebben. Uit afvoermetingen op dergelijke percelen is gebleken, dat ook voor het optreden van oppervlakte afvoer een ronde ligging echter niet noodzakelijk is.

Wat de waterstagnatie op de plaatsen van oude greppels betreft, kan het volgende opgemerkt worden. Op gedraineerde en heringezaaide, tijdens de herinzaai min of meer geëgaliseerde, percelen werd geen waterstagnatie en plasvorming waargenomen behalve in uitzonderingsgevallen, zoals bij vooraf gaand gebruik als bouwland. Op percelen, waar geen egalisatie en herinzaai werd toegepast en drainage in de oude greppels, en wel om de andere greppel, plaats vond, werd bij het niet opvullen van deze greppels in regenperiodes soms enig water in de overgebleven greppel waargenomen, dat echter na 1 à 2 dagen weer verdwenen was door verticale wegzakking zonder open greppelafvoer. Bij opvulling van deze greppels, waarbij nog altijd een lage plek overblijft, werd vrijwel nooit water in deze laagten vastgesteld. Wanneer het drainagesysteem op voldoende diepte ligt en goed functioneert, behoeft geen vrees te bestaan voor waterstagnatie van enige duur.

Wanneer men drain- en greppelafvoermetingen vergelijkt, blijkt dat de drainafvoer minder hoge afvoersnelheden te zien geeft, maar langer duurt dan de greppelafvoer. Dit kan verklaard worden, doordat in het geval van drainage de afvoer overwegend als diepe afvoer plaats vindt en de grond door de lagere ontwateringsbasis in sterkere mate een bufferende werking op het afvoerproces kan uitoefenen. Hierdoor zal de maximale afvoersnelheid lager zijn, maar het afvoerproces langer duren dan in het geval van begreppeling, waarbij de ondiepe afvoer overweegt en de grond een geringere bufferende invloed heeft.

3. SAMENVATTING

De afvoersnelheid en het potentiaalverschil in de goed doorlatende ondergrond werden berekend volgens twee methoden, namelijk onder toepassing van een geleidelijk afnemende zakwaterstroming en een bergingscoëfficiënt van 0,01, voor het traject van de grondwaterstandsverandering; en onder toepassing van een zakwaterstroming, die gelijk is aan het neerslagverloop, en een hogere bergingscoëfficiënt van 0,035, voor het gehele profiel.

De eerste methode kan alleen toegepast worden, indien de zakwaterstroming te berekenen is. De zaksnelheid ter plaatse van de grondwaterstand in een bepaalde periode

wordt namelijk berekend uit de diepe afvoer en de hoeveelheid water die geborgen wordt of vrijkomt in het traject van de grondwaterstandsverandering gedurende deze periode. Hiervoor dient men over de waarnemingen van de diepe afvoersnelheid en het potentiaalverschil in de goed doorlatende ondergrond te beschikken. Bij deze methode, waarbij verondersteld wordt dat de berging in het gehele profiel plaats vindt, wordt een geleidelijk afnemende zakwaterstroming, die eerst eindigt met het einde van de afvoerperiode, en de bergingscoëfficiënt van het traject van de grondwaterstandsverandering toegepast.

Wanneer de eerste berekeningsmethode niet mogelijk is, zoals voor te verwachten neerslagperiodes waarvan men het afvoer- en grondwaterstandsverloop wil berekenen, kan de tweede methode toegepast worden. Bij deze methode, waarbij verondersteld wordt dat de berging geconcentreerd in het traject van de grondwaterstandsverandering plaatsvindt, wordt de zaksnelheid gelijk gesteld aan de neerslagintensiteit en wordt de bergingscoëfficiënt van het gehele profiel toegepast.

De waarden berekend volgens de eerste methode komen goed overeen met de waarnemingen, behalve de waarden van de afvoersnelheid tijdens de eerste uren van de afvoerperiode, hetgeen aan ondiepe- en sleufafvoer moet worden toegeschreven. De waarden berekend volgens de tweede methode komen enigszins minder goed met de waarnemingen overeen. Naarmate de veronderstelling dat de hoeveelheid zakwater gelijk is aan de neerslag beter benaderd wordt door een geringer vochttekort van het profiel, een geringere verdamping en minder ondiepe afvoer, zal de overeenstemming beter zijn.

Een lagere berekende afvoersnelheid tijdens de eerste uren van de afvoerperiode kan niet geheel verklaard worden door een snellere afvoer van de ter plaatse van de drainsleuf gevallen neerslag, maar moet tevens worden toegeschreven aan het optreden van ondiepe afvoer. Het verschil met de waargenomen afvoersnelheid is het grootste tijdens de afvoerperiode met de hoogste regenintensiteit. De betekenis van de ondiepe afvoer is op gedraineerde percelen in het algemeen voor de totale afvoer niet groot, daar deze slechts gedurende korte tijd optreedt.

In tegenstelling tot gedraineerde percelen vindt de afvoer op begreppelde percelen overwegend als ondiepe afvoer plaats. Daar in dit geval de grond in geringere mate een bufferende werking op het afvoerproces kan uitoefenen, is de maximale afvoersnelheid groter en wordt de neerslag in een kortere tijd afgevoerd. Zeer hoge waarden voor de ondiepe afvoersnelheid kunnen berekend worden, wanneer de doorlaatfactor van de bovenste centimeters van de zodelaag enige m/dag bedraagt en de ondiepe grondwaterstroming hierin plaatsvindt.

V. HET ONTWERINGSSYSTEEM

1. DE GEMIDDELDE HYDROLOGISCHE WAARDEN VAN HET KOMGRONDPROFIEL

Uit de gegevens die in hoofdstuk III vermeld zijn, is het mogelijk gemiddelde hydrologische waarden voor het komgrondprofiel af te leiden. De *KD*-waarde van de goed doorlatende ondergrond, bepaald volgens de grondwaterstands-debietmethode en vermeld in tabel 5, varieert voor de onderzochte proefvelden, die met uitzondering van het drainageproefveld in het Hollanderbroek en de groep gedraineerde percelen in het Land van Maas en Waal circa 2 ha groot zijn, van 0,6 tot 1,4 m²/dag. Alleen het drainageproefveld in de Tielerwaard bij Hellouw wijkt met een *KD*-waarde van 9,5 m²/dag hiervan sterk af. De goed doorlatende ondergrond bestaat zowel uit concreterijk klei, als lichtere lagen als humeuze en venige klei tot veen. Op grond van de waarden vermeld in tabel 5, wordt de gemiddelde *KD*-waarde op 1 m²/dag gesteld.

De radiale weerstand, eveneens bepaald volgens de grondwaterstands-debietmethode, varieert voor de proefvelden van 0 tot 3,4 dag/m en bedraagt gemiddeld 0,9 dag/m. Hierbij moet rekening gehouden worden met de draindiepte, die doorgaans 0,70 à 0,80 m -mv bedraagt om voldoende speling te houden ten opzichte van het slootpeil voor afvoermetingen. Op de drainageproefvelden in de Tielerwaard bij Hellouw en in het Hollanderbroek, waar een grotere draindiepte kon worden toegepast en waar deze respectievelijk 0,90 à 1,00 en 1,00 à 1,20 m -mv bedraagt, is de radiale weerstand lager dan in de overige gevallen. Gaat men voor de praktijkomstandigheden uit van een gemiddelde draindiepte van ongeveer 1,00 m -mv, dan zal de radiale weerstand kleiner zijn dan 0,9 dag/m en kan hiervoor een waarde van 0,5 dag/m worden aangenomen.

Wat de radiale weerstand van sloten betreft, deze kan in de drie hieronder vermelde gevallen zo groot zijn, dat het radiale potentiaalverschil vrijwel overeenkomt met het totale potentiaalverschil. In deze gevallen geeft het potentiaalverloop op korte afstand van de sloot een scherpe knik te zien, waarna het op grotere afstand vrijwel horizontaal is. Dit verschijnsel wordt doorgaans het slootwand- of slootkanteffect genoemd.

In het eerste geval is de slootbodem gelegen in een slecht doorlatende laag en kan de radiale weerstand verlaagd worden door de sloot uit te graven tot in de goed doorlatende ondergrond, indien deze laatste aanwezig is.

Het tweede geval kan zich voordoen, wanneer de slootbodem weliswaar in een goed doorlatende laag gelegen is, maar de sloot zodanig vervuild is dat het contact met de goed doorlatende laag is verbroken. Onder deze omstandigheden kan de radiale weerstand verlaagd worden door het opschonen van de sloten, waarbij in het bijzonder de baggerlaag van de slootbodem verwijderd moet worden.

In het derde geval bevindt zich langs de sloot een zone met een geringe doorlaatfactor, terwijl op grotere afstand van de sloot de doorlaatfactor veel hoger is. Dit geval is door SONNEVELD (25) aangetoond voor het klei-op-veengebied in Zuid-Holland en wordt door hem toegeschreven aan het op korte afstand van de sloot kleiner worden van de doorlaatfactor door samendrukking van het veen tengevolge van inklinking

zonder dat uitdroging en scheurvorming optreden, waarbij de scheurvorming op grotere afstand van de sloot de doorlaatfactor doet toenemen. In dit geval kan de radiale weerstand niet verlaagd worden door het uitgraven of opschonen van de sloten, maar moet een drainagesysteem toegepast worden waarbij via korte reeksen door de slecht doorlatende zone contact gemaakt wordt tussen het goed doorlatende perceels-gedeelte en de sloot. Dit is met goede resultaten toegepast in het klei-op-veengebied in Utrecht en beschreven door VAN SOMEREN (24).

Indien het derde geval veroorzaakt wordt op de bovengenoemde wijze, zal dit verschijnsel kunnen optreden wanneer de afdekkende kleilaag onvoldoende bescherming biedt tegen uitdroging en inklinking van het daaronder liggende veen. In tegenstelling tot SONNEVELD (26), die voor de komgrondprofielen in het Land van Heusden en Altena, zowel bij komklei als humeuze en venige klei in de laag van 0,80 tot 1,20 m -mv tot de conclusie kwam van een geringere doorlaatfactor in een zone ter breedte van 10 m langs de sloot, konden op de drainageproefvelden, zowel met komklei als humeuze en venige klei in de goed doorlatende ondergrond, geen significante verschillen worden vastgesteld bij de bepaling van de doorlaatfactor volgens de boorgatenmethode in dwarsraaien van sloot tot sloot. Evenmin kon uit het potentiaalverloop bij ontwaterings- en infiltratieproeven worden vastgesteld, dat bij opgeschoonde, en tot in de goed doorlatende ondergrond uitgegraven, sloten een hogere radiale weerstand optrad dan bij drainreeksen. In sommige gevallen was de radiale weerstand van sloten lager dan die van de drainreeksen, in andere gevallen gelijk, zoals in het geval van figuur 18 met een dunne goed doorlatende laag, waarbij de grotere natte omtrek van de sloten geen rol speelt. Derhalve wordt verondersteld dat bij goed onderhouden, en tot in de goed doorlatende ondergrond uitgegraven, sloten op komgrond geen slootkanteffect in een of andere vorm optreedt. Hoewel sloten ten gevolge van de grotere natte omtrek in het algemeen een lagere radiale weerstand zullen hebben dan drains, zal bij de berekening in dit hoofdstuk dezelfde waarde voor de radiale weerstand van sloten en drains, namelijk 0,5 dag/m, worden aangenomen.

Als gemiddelde doorlaatfactor van de slecht doorlatende laag, kan een waarde van 0,05 m/dag worden aangenomen. De dikte van deze laag kan op 0,50 m gesteld worden, liggende tussen 0,20 en 0,70 m -mv. Een grotere doorlaatfactor tengevolge van scheurvorming komt voor een berekening tijdens afvoerperioden niet in aanmerking. Een doorlaatfactor van 0,2 à 0,4 m/dag als gevolg van het voorkomen van fijne ijzerconcreties in de slecht doorlatende laag wordt als een uitzondering beschouwd.

Wat de zodelaag betreft, wordt aangenomen dat de dikte 0,20 m bedraagt en de doorlaatfactor zodanig met de diepte afneemt, dat ondiepe afvoer overwegend in de bovenste 5 à 10 cm plaatsvindt. Een zeer kleine doorlaatfactor tengevolge van een laag humusgehalte of vertrapping, waardoor de afvoer als oppervlakte-afvoer over het maaiveld moet plaatsvinden, wordt als een uitzondering beschouwd. In het geval van bouwland wordt voor de bouwvoor hetzelfde verondersteld.

Wat de bergingscoëfficiënt betreft, zal bij de berekeningen een constante waarde voor het gehele profiel van 0,035 worden toegepast.

2. HET GRONDWATERSTANDSVERLOOP BIJ VERSCHILLENDE ONTWATERINGSCRITEIA

In de hoofdstukken II en IV werd er op gewezen dat in een komgrondprofiel zowel diepe afvoer door de slecht doorlatende laag en de goed doorlatende ondergrond, als ondiepe afvoer door de zodelaag of bouwvoor kan plaatsvinden en dat de verhouding afhankelijk is van de regenintensiteit en de snelheid waarmee het water in de slecht doorlatende laag dringt. Deze indringingssnelheid is weer afhankelijk van de doorlaatfactor en dikte van de slecht doorlatende laag en de potentiaal in de goed doorlatende ondergrond en daarmee van die factoren, die van invloed zijn op de potentiaal in de goed doorlatende ondergrond, namelijk het peil in de open watergang, de afstand tussen de open watergangen, de ligging van de open watergang ten opzichte van de goed doorlatende ondergrond en de *KD*-waarde van deze laag.

De regenintensiteit vertoont volgens het onderzoek van LEVERT (17) een grote spreiding, waarbij de hoge waarden in het bijzonder tijdens kortdurige regenval in de zomer optreden. De gemiddelde regenintensiteit bij langdurige regenval van enige uren, kan op circa 1 mm/uur gesteld worden. Deze is kleiner dan de gemiddelde doorlaatfactor van de slecht doorlatende laag, die 0,05 m/dag, d.i. 2 mm/uur, bedraagt. In paragraaf IV, 1c is gebleken dat op een komgrondprofiel, waar in de betrokken perioden de doorlaatfactor van de slecht doorlatende laag gelijk of enigszins kleiner was dan de gemiddelde waarde en de grondwaterstand onder de zodelaag bleef, bij een gemiddelde regenintensiteit van 0,95 en 1,1 mm/uur niettemin nog een geringe ondiepe afvoer optrad. Voor de hiernavolgende berekening van de diepe grondwaterstand, die de resultante is van de potentiaalverschillen in de slecht doorlatende laag en in de goed doorlatende ondergrond, zal echter worden aangenomen dat bij bovengenoemde verhouding tussen de gemiddelde regenintensiteit en doorlaatfactor van de slecht doorlatende laag geen ondiepe afvoer optreedt, voordat de diepe grondwaterstand gestegen is tot in de zodelaag of bouwvoor.

Het diepe grondwaterstandsverloop kan berekend worden voor neerslagperioden van verschillende duur en zwaarte. In tabel 31 is de neerslag, afgerond op mm, weer van verschillende duur en zwaarte. In tabel 31 is de neerslag, afgerond op mm, gegeven, die 1 maal per jaar, 1 maal per 2 jaar, 1 maal per 5 jaar en 1 maal per 10 jaar bereikt of overschreden wordt in perioden van 1, 2, 3, 5 en 7 dagen voor de verschillende maanden. Deze tabel is berekend uit de gegevens van het station Utrecht over de perioden 1849–1898 en 1919–1953 (10). Hieruit kan echter niet afgeleid worden, op welke wijze de neerslag per dag verdeeld is en evenmin hoe de neerslag bij een meerdaagse periode verdeeld is over de verschillende dagen. Bij de berekening zal uitgegaan worden van de veronderstelling dat de neerslag regelmatig verdeeld valt over de gehele dag, dat de zwaarste neerslag op de eerste dag valt en de neerslag op de tweede dag gelijk is aan het verschil van de tweedaagse en ééndaagse periode, enz.

Wat de belasting van het grondwaterreservoir betreft, moet men rekening houden met de neerslagoverschotten en derhalve met de verdamping en in het bijzonder de berging. Daar de gegevens over de verdamping tijdens de neerslagperioden en over de berging ontbreken, is het niet mogelijk een frequentietabel van de neerslagoverschotten op te stellen en kan men slechts gemiddelde waarden voor de verdamping en

TABEL 31. De neerslag in mm, die in 1-, 2-, 3-, 5- en 7-daagse perioden 1 maal per jaar, 1 maal per 2 jaar, 1 maal per 5 jaar en 1 maal per 10 jaar bereikt of overschreden wordt. De gegevens hebben betrekking op het station Utrecht over de jaren 1849-1898 en 1919-1953

Maand	1 maal per jaar					1 maal per 2 jaar				
	1 dag	2 dag	3 dag	5 dag	7 dag	1 dag	2 dag	3 dag	5 dag	7 dag
Januari	11	17	22	29	36	14	21	27	35	42
Februari	10	15	20	28	34	13	18	26	35	41
Maart	9	14	18	26	34	12	18	23	32	40
April	10	15	19	27	33	13	19	24	32	39
Mei	11	17	23	31	38	14	22	28	38	44
Juni	12	20	27	37	42	18	26	33	42	49
Juli	17	26	31	45	55	22	31	40	54	66
Augustus	17	26	36	48	59	21	34	43	57	70
September	14	23	29	40	49	18	27	36	47	55
Oktober	13	22	30	43	53	19	28	38	52	64
November	12	20	26	35	43	16	24	30	42	53
December	12	19	25	36	46	15	24	31	43	54

Month	1 day	2 day	3 day	5 day	7 day	1 day	2 day	3 day	5 day	7 day
	Once per year					Once per 2 years				

Maand	1 maal per 5 jaar					1 maal per 10 jaar				
	1 dag	2 dag	3 dag	5 dag	7 dag	1 dag	2 dag	3 dag	5 dag	7 dag
Januari	19	26	32	42	50	23	30	37	48	56
Februari	18	26	32	42	52	20	32	38	57	65
Maart	17	23	31	40	47	20	29	34	45	52
April	17	26	32	40	48	22	32	38	46	51
Mei	20	28	33	43	49	25	31	38	45	53
Juni	24	34	40	48	62	29	39	42	54	66
Juli	30	42	53	68	72	34	50	66	70	84
Augustus	30	45	55	72	80	38	54	74	78	88
September	24	34	43	52	67	27	39	47	67	73
Oktober	25	35	47	62	73	29	42	51	66	80
November	21	28	38	52	65	24	37	45	63	75
December	21	31	40	55	66	26	38	46	63	72

Month	1 day	2 day	3 day	5 day	7 day	1 day	2 day	3 day	5 day	7 day
	Once per 5 years					Once per 10 years				

TABEL 31. The precipitation in mm., which in 1-, 2-, 3-, 5- and 7-day periods may be expected once per year, once per 2 years, once per 5 years and once per 10 years. The values were calculated from data from the meteorological station at Utrecht, for the years 1849-1898 and 1919-1953

de berging in de verschillende maanden toepassen. De zwaarste belasting zal dan optreden in de maanden november en december, wanneer de verdamping van circa 0,15 mm/dag ten opzichte van de neerslag verwaarloosd kan worden en de vochttoe-

stand na het neerslagoverschot in september en oktober overeenkomt met het evenwichtsvochtgehalte.

Voor de berekening van het diepe grondwaterstandsverloop wordt uitgegaan van een reeks opeenvolgende ontwateringscriteria, waarin de diepe afvoersnelheid in de stationaire toestand 11, 9, 7, 5, 3, 2, 1 en 0,5 mm/dag bedraagt bij een grondwaterstand van 0,20 m -mv en een peil in de open watergang, hetzij sloot of drain, van 0,90 m -mv. Voor een drain betekent dit een diepte van circa 1,00 m -mv.

Elke verhouding tussen afvoersnelheid en potentiaalverschil kan een gevolg zijn van verschillende combinaties van de doorlaatfactor en de dikte van de slecht doorlatende laag, de KD -waarde van de goed doorlatende ondergrond, de radiale weerstand en de afstand tussen de open watergangen. Bij een doorlaatfactor, resp. dikte van de slecht doorlatende laag van 0,05 m/dag en 0,50 m bedraagt het potentiaalverschil in deze laag respectievelijk 11, 9, 7, 5, 3, 2, 1 en 0,5 cm en het potentiaalverschil, beschikbaar voor de goed doorlatende ondergrond: 59, 61, 63, 65, 67, 68, 69 en 69,5 cm. Bij een KD -waarde van 1 m²/dag en een radiale weerstand van 0,5 dag/m bedraagt de afstand tussen de open watergangen dan respectievelijk 19, 22, 25, 30, 40, 50, 72 en 104 m.

Aan de in paragraaf I, 2a genoemde voorwaarde, dat de natte omtrek van de open watergang groter moet zijn dan al/K , wordt ook bij het meest strenge ontwateringscriterium voldaan. In dat geval bedraagt al/K , 0,21 m, indien K op 1 m/dag gesteld wordt, terwijl de natte omtrek van de drains 0,25 à 0,35 m bedraagt en de natte omtrek van sloten nog groter is. Uit het in de genoemde paragraaf berekende voorbeeld blijkt bovendien, dat de vergroting van het radiale potentiaalverschil door het optreden van een kweloppervlakte bij het overschrijden van deze voorwaarde vrijwel gecompenseerd wordt door de verlaging van de radiale weerstand.

De diepe afvoersnelheid en het potentiaalverschil in de goed doorlatende ondergrond tijdens een neerslagperiode kunnen nu worden berekend met de vergelijkingen 2.12 en 2.13. Door het potentiaalverschil in de goed doorlatende ondergrond te vermeerderen met het potentiaalverschil in de slecht doorlatende laag is het diepe grondwaterstandsverloop verkregen. Zoals in hoofdstuk IV uiteengezet werd, kan voor neerslagperiodes waarvan de zakwaterstroming niet berekend kan worden, een zakwaterstroming die gelijk is aan het neerslagverloop en de bergingscoëfficiënt van het waterstroming die geheel is aan het neerslagverloop en de bergingscoëfficiënt van het gehele profiel worden toegepast. Bij de berekening wordt verondersteld dat geen ondiepe afvoer optreedt voordat de diepe grondwaterstand tot in de zodelaag is gestegen, en dat het vochttekort van het bodemprofiel te verwaarlozen is. Een eventuele verdamping wordt in mindering gebracht op de neerslag. Bij een bergingscoëfficiënt van 0,035 kan met vergelijking 2.20 voor bovengenoemde ontwateringscriteria een reservoircoëfficiënt berekend worden respectievelijk van 1,5; 1,9; 2,5; 3,6; 6,2; 9,5; 19 en 38 dag. In tabel 32 zijn voor de verschillende ontwateringscriteria de diepe afvoersnelheid in stationaire toestand, het totale potentiaalverschil, het potentiaalverschil in de slecht doorlatende laag en in de goed doorlatende ondergrond, de afstand tussen de open watergangen en de reservoircoëfficiënt samengevat.

In figuur 24 a, b, c en d is het diepe grondwaterstandsverloop weergegeven tijdens de neerslag, die in een zevendaagse periode in november 1 maal per jaar, 1 maal per

TABEL 32. De diepe afvoersnelheid in stationaire toestand, het totale potentiaalverschil, het potentiaalverschil in de slecht doorlatende laag en in de goed doorlatende ondergrond, de afstand tussen de open watergangen en de reservoircoëfficiënt bij de aanname van verschillende ontwateringscriteria op het gemiddelde komgrondprofiel. Van dit profiel is de *KD*-waarde van de goed doorlatende ondergrond op 1 m²/dag gesteld, de radiale weerstand op 0,5 dag/m, de doorlaatfactor resp. dikte van de slecht doorlatende laag op 0,05 m/dag en 0,50 m en de bergingscoëfficiënt van het gehele profiel op 0,035

a_s in mm/dag	Δh in cm	Δh_s in cm	Δh_d in cm	l in m	j in dag
11	70	11	59	19	1,5
9	70	9	61	22	1,9
7	70	7	63	25	2,5
5	70	5	65	30	3,6
3	70	3	67	40	6,2
2	70	2	68	50	9,5
1	70	1	69	72	19
0,5	70	0,5	69,5	104	38
a_s in mm/day	Δh in cm.	Δh_s in cm.	Δh_d in cm.	l in m.	j in day

TABLE 32. The rate of deep discharge for steady-state flow, the total potential difference, the potential difference in the low-permeable layer and in the high-permeable subsoil, the drain spacing and the reservoir-coefficient at different assumed drainage criteria for the mean basin clay soil. For this soil profile the following values have been taken: *KD*-value of the high-permeable subsoil 1 m²/day, radial resistance 0,5 day/m, hydraulic conductivity resp. thickness of the low-permeable layer 0.05 m/day and 0.50 m., storage capacity of the total profile 0.035

2 jaar, 1 maal per 5 jaar en 1 maal per 10 jaar bereikt of overschreden wordt, voor de ontwateringscriteria met een afvoersnelheid van 2, 3, 5, 7, 9 en 11 mm/dag en een potentiaalverschil van 70 cm in stationaire toestand. Tevens is verondersteld dat hieraan een constante regenval van 2 mm/dag, d.w.z. de gemiddelde dagelijkse neerslag in november, voorafgaat en hierop volgt, dat de verdamping verwaarloosd kan worden en dat het peil in de open watergang 0,90 m -mv bedraagt.

Bij het ontwateringscriterium met een afvoersnelheid van 2 mm/dag komt de diepe grondwaterstand bij het begin van de zevendaagse periode reeds overeen met de onderkant van de zodelaag en zal een groot gedeelte van de neerslag ondiep worden afgevoerd. Daar een niet-stationaire berekening van de ondiepe afvoer en de waterstand in de zodelaag of bouwvoor niet mogelijk is en de ondiepe stroming in hoofdzaak in de bovenste 10 cm plaatsvindt, is bij de berekening aangenomen, dat de grondwaterstand tot het maaiveld kan stijgen. Een globale berekening van de ondiepe afvoer is als volgt mogelijk. Op grond van de waarnemingen op begreppelde percelen wordt aangenomen dat de neerslag één à twee dagen na het einde van de neerslagperiode is afgevoerd. Wanneer de diepe afvoersnelheid op circa 2,5 mm/dag gesteld wordt – enigszins hoger dan 2 mm/dag ten gevolge van het grotere potentiaalverschil en de niet-stationaire stroming – dan bedraagt de diepe afvoer tijdens een periode van 8 à 9 dagen 20 à 22,5 mm. De ondiepe afvoer bedraagt dan circa 22 mm, d.i. 55% van de neerslaghoeveelheid van 43 mm, die 1 maal per jaar in een zevendaagse periode bereikt of overschreden wordt. Bij ontwateringscriteria met een afvoersnelheid van 1 en

FIG. 24a. Het diepe grondwaterstandsverloop op het gemiddelde komgrondprofiel, tijdens de neerslag die in een zevendaagse periode 1 maal per jaar in november bereikt of overschreden wordt, nl. op de achtereenvolgende dagen 12; 8; 6; 4,5; 4,5; 4 en 4 mm/dag, waar een constante neerslag van 2 mm/dag aan voorafgaat en op volgt. Het peil in de open watergang bedraagt 0,90 m.-mv. De ontwateringscriteria voldoen aan een diepe afvoersnelheid van 2, 3, 5, 7, 9 en 11 mm/dag en een potentiaalverschil van 70 cm in stationaire toestand

FIG. 24b. Idem, tijdens de neerslag die in een zevendaagse periode 1 maal per 2 jaar in november bereikt of overschreden wordt, nl. op de achtereenvolgende dagen 16; 8; 6; 6; 6; 5,5 en 5,5 mm/dag, waar een constante neerslag van 2 mm/dag aan vooraf gaat en op volgt

FIG. 24c. Idem, tijdens de neerslag die in een zevendaagse periode 1 maal per 5 jaar in november bereikt of overschreden wordt, nl. op de achtereenvolgende dagen 21; 7; 10; 7; 7; 6,5 en 6,5 mm/dag, waar een constante neerslag van 2 mm/dag aan voorafgaat en op volgt

FIG. 24d. Idem, tijdens de neerslagperiode die in een zevendaagse periode 1 maal per 10 jaar in november bereikt of overschreden wordt, nl. op de achtereenvolgende dagen 24; 13; 8; 9; 9; 6 en 6 mm/dag, waar een constante neerslag van 2 mm/dag aan voorafgaat en op volgt

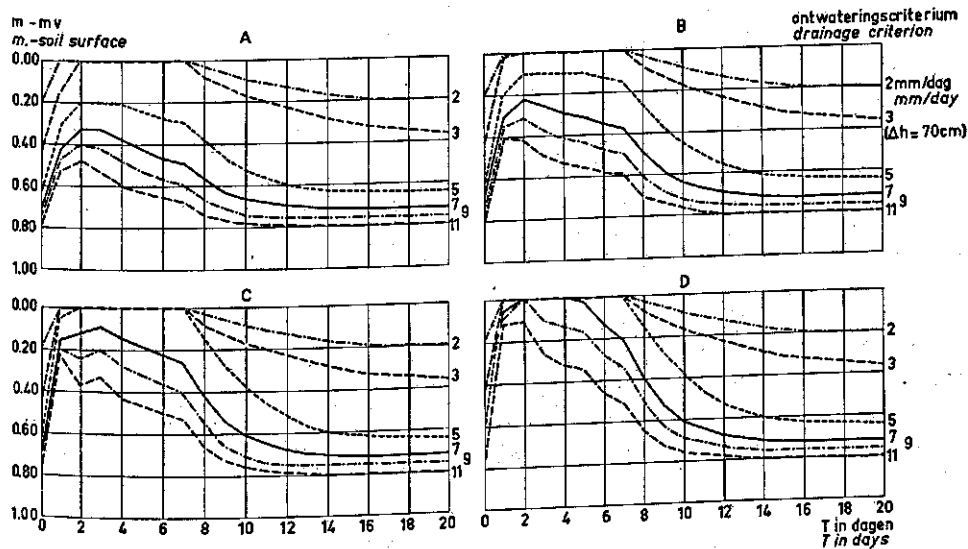


FIG. 24a. The change of the ground-water level in the mean basin clay profile in case of a seven-day's precipitation period, which may be expected once per year in November, the precipitation being 12; 8; 6; 4.5; 4.5; 4 and 4 mm/day, preceded and followed by a constant precipitation of 2 mm/day. The water level in the ditch or tile line is kept at 0.90 m. below surface. The drainage criteria are conforming to a rate of deep discharge of 2, 3, 5, 7, 9 and 11 mm/day and a potential difference of 70 cm. for steady state flow

FIG. 24b. The same as figure 24a, in case of a seven-day's precipitation period, which may be expected once per 2 years in November, the precipitation being 16; 8; 6; 6; 6; 5.5 and 5.5 mm/day, preceded and followed by a constant precipitation of 2 mm/day

FIG. 24c. The same as figure 24a, in case of a seven-day's precipitation period, which may be expected once per 5 years in November, the precipitation being: 21; 7; 10; 7; 7; 6.5 and 6.5 mm/day, preceded and followed by a constant precipitation of 2 mm/day

FIG. 24d. The same as figure 24a, in case of a seven-day's precipitation period, which may be expected once per 10 years in November, the precipitation being 24; 13; 8; 9; 9; 6 and 6 mm/day, preceded and followed by a constant precipitation of 2 mm/day

0,5 mm/dag zal de ondiepe afvoer circa 35 en 40 mm, d.i. 80 en 90 % van de neerslag, bedragen. Het diepe grondwaterstandsverloop is voor deze criteria niet meer weergegeven, daar dit geheel in de zodelaag plaatsvindt en vrijwel overeen zal komen met dat bij een afvoersnelheid van 2 mm/dag. Naarmate de neerslaghoeveelheden groter worden, zal de ondiepe afvoer een groter percentage van de neerslag uitmaken.

Bij het ontwateringscriterium met een afvoersnelheid van 3 mm/dag stijgt de diepe grondwaterstand, tijdens de neerslag met een overschrijdingskans van 1 maal per jaar, op de tweede dag tot het maaiveld, waarbij de diepe afvoersnelheid ongeveer 4 mm/dag zal bedragen en deze vrijwel gelijk is aan de verdere neerslagintensiteit. In werkelijkheid zal echter ondiepe afvoer optreden, doch in mindere mate dan in bovengenoemde gevallen.

Bij het ontwateringscriterium met een afvoersnelheid van 5 mm/dag blijft de diepe grondwaterstand, tijdens de neerslag met een overschrijdingskans van 1 maal per jaar, onder de zodelaag of bouwvoor en zal alleen diepe afvoer plaatsvinden. In de neerslagperiode met een overschrijdingskans van 1 maal per 2 jaar zal enige ondiepe afvoer optreden, die toeneemt in de zwaardere neerslagperioden van 1 maal per 5 en 10 jaar.

Bij het ontwateringscriterium met een afvoersnelheid van 7 mm/dag blijft de diepe grondwaterstand, tijdens de neerslag met een overschrijdingskans van 1 maal per jaar en 1 maal per 2 jaar onder de zodelaag of bouwvoor. Eerst tijdens de neerslag met een overschrijdingskans van 1 maal per 5 jaar zal ondiepe afvoer optreden.

Bij het ontwateringscriterium met een afvoersnelheid van 9 en 11 mm/dag treedt de ondiepe afvoer eerst op tijdens de neerslag met een overschrijdingskans van 1 maal per 10 jaar.

Men kan ook van de veronderstelling uitgaan dat tijdens zware neerslagen de regenintensiteit tijdelijk zo groot is, dat ondiepe afvoer optreedt voordat de diepe grondwaterstand gestegen is tot in de zodelaag of bouwvoor. In paragraaf IV, 1c bleek de ondiepe afvoer bij een regenintensiteit van 1,4 mm/uur op de drie objecten, 10, 10 en 30 % van de neerslag te bedragen. Stelt men de ondiepe afvoer op 15 % van de neerslag,

FIG. 24e. Idem, tijdens de neerslag die in een zevendaagse periode 1 maal per 5 jaar in november bereikt of overschreden wordt, wanneer 15% van de neerslag door de zodelaag wordt afgevoerd, voordat de diepe grondwaterstand tot in de zodelaag gestegen is

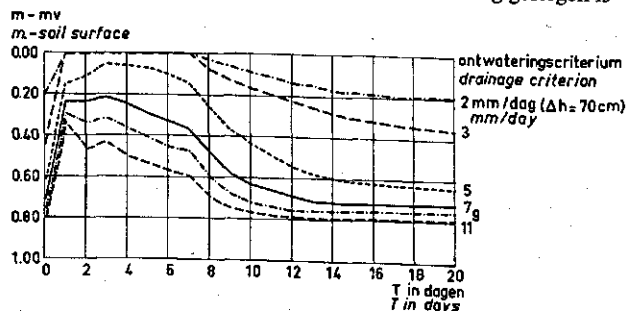


FIG. 24e. The same as figure 24a, in case of a seven-day's precipitation period, which may be expected once per 5 years in November assuming 15% of the precipitation is removed through the turf layer before the ground-water level has risen into the turf layer

dan kan de zakwaterstroming met een dergelijk bedrag verminderd worden. Gedurende de neerslagperiode in november, met een overschrijdingskans van 1 maal per 5 jaar, blijft bij de ontwateringscriteria met een afvoersnelheid van 7, 9 en 11 mm/dag de diepe grondwaterstand beneden de zodelaag of bouwvoor, zoals in figuur 24 e is weergegeven, en in deze gevallen zal een diepe en ondiepe grondwaterzone voorkomen.

Tenslotte is in figuur 24 f het grondwaterstandsverloop bij het ontwateringscriterium met een afvoersnelheid van 7 mm/dag weergegeven tijdens de neerslagperiode in november met een overschrijdingskans van 1 maal per jaar, waarbij drie mogelijkheden voor de neerslagverdeling in deze periode zijn aangenomen, namelijk in het eerste geval 12; 8; 6; 4,5; 4,5; 4 en 4 mm, in het tweede geval 4,5; 4,5; 12; 8; 6; 4 en 4 mm en in het derde geval 4; 4; 4,5; 4,5; 6; 8 en 12 mm. Hieruit blijkt dat in het derde geval de maximale grondwaterstand hoger is, maar de gemiddelde grondwaterstand lager.

FIG. 24f. Idem, tijdens de neerslag die in een zevendaagse periode 1 maal per jaar in november bereikt of overschreden wordt, waarbij respectievelijk de neerslag als volgt verdeeld is: periode I, 12; 8; 6; 4,5; 4,5; 4 en 4 mm; periode II, 4,5; 4,5; 12; 8; 6; 4 en 4 mm; periode III, 4; 4; 4,5; 4,5; 6; 8 en 12 mm, waar in elke periode een constante neerslag van 2 mm/dag aan voorafgaat en op volgt

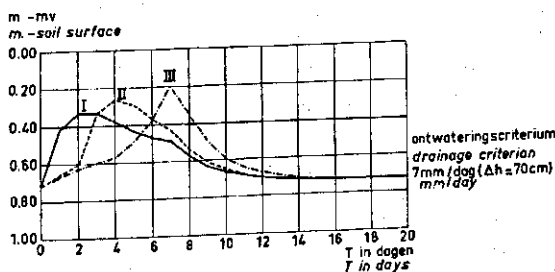


FIG. 24f. The same as figure 24a, in case of a seven day's precipitation which may be expected once per year in November, with the following distribution of precipitation: period I, 12; 8; 6; 4.5; 4.5; 4 and 4 mm; period II, 4.5; 4.5; 12; 8; 6; 4 and 4 mm; period III, 4; 4; 4.5; 4.5; 6; 8 and 12 mm, in every period preceded and followed by a constant precipitation of 2 mm/day

Uit de bovenbeschreven gevallen blijkt, dat bij ontwateringscriteria met een afvoersnelheid van 7 mm/dag en meer en een potentiaalverschil van 70 cm, vrijwel de gehele afvoer als diepe afvoer plaatsvindt en ondiepe afvoer relatief weinig voorkomt, dat bij ontwateringscriteria met een afvoersnelheid van 2 mm/dag en minder, de ondiepe afvoer overheerst en dat ontwateringscriteria met een afvoersnelheid van 3 en 5 mm/dag een tussenpositie innemen. Een overeenkomstig grondwaterstandsverloop en een dag een tussenpositie innemen. Een overeenkomstig grondwaterstandsverloop en een overeenkomstige verhouding tussen diepe en ondiepe afvoer zal optreden tijdens de neerslagen die met eenzelfde overschrijdingskans in de overige herfst- en wintermaanden optreden. Naarmate de neerslag lichter wordt, zal de ondiepe afvoer kleiner worden. Ook een verandering van het peil van de open watergang (in figuur 24 e) is van invloed voor te stellen door een verandering van de maaiveldshoogte) is van invloed op de verhouding tussen de diepe en ondiepe afvoer, waarbij een verhoging van dit peil een toename van de ondiepe afvoer zal veroorzaken.

Men dient zich nu af te vragen, welke gevolgen de ondiepe afvoer voor het ontwateringssysteem heeft. Daar de ondiepe afvoer en de daarbij behorende greppelafstand niet berekend kunnen worden zoals de diepe afvoer en de sloot- of drainafstand, kan men de greppelafstanden in de praktijk, die tussen 10 en 20 m variëren, als maatstaf hanteren. Hierbij moet men er rekening mee houden, dat deze greppelafstanden gebaseerd zijn op de oude afwateringstoestand met een hoger polderpeil dan na de verbetering van de afwatering het geval kan zijn. In dit verband kan opgemerkt worden, dat de greppels op graslandpercelen gelegen op de hooggelegen stroomruggen tegenwoordig vrijwel geen dienst doen, behalve in perioden van zware neerslag of wegdooiende sneeuw.

De ontwateringscriteria met afvoersnelheden van 11, 9, 7, 5, 3, 2, 1 en 0,5 mm/dag en een potentiaalverschil van 70 cm komen op het gemiddelde komgrondprofiel overeen met sloot- of drainafstanden van 19, 22, 25, 30, 40, 50, 72 en 104 m. In de praktijk zullen vrijwel geen slootafstanden van minder dan 40 m voorkomen, zodat de kleinere waarden betrekking hebben op drainafstanden. Daar bij afstanden van 19 tot 25 m de ondiepe afvoer weinig voorkomt en door de drainsleuf kan plaatsvinden, zal een aparte voorziening voor de ondiepe afvoer niet nodig zijn en zal de ontwatering kunnen plaatsvinden door een systeem van sloten en drains. Bij een afstand van 30 m is dit wellicht ook nog mogelijk. Bij afstanden van 40 tot 100 m zal echter, om te voorkomen dat de grondwaterstand vrijwel voortdurend gelijk staat met het maaiveld, een voorziening voor de ondiepe afvoer getroffen moeten worden en de ontwatering moeten plaatsvinden door een systeem van sloten en greppels.

Voor de ontwateringscriteria met een afvoersnelheid van 7 en 9 mm/dag en een potentiaalverschil van 70 cm, is de diepe afvoersnelheid berekend tijdens de neerslagperioden in november met een overschrijdingskans van 1 maal per jaar, 1 maal per 2 jaar, 1 maal per 5 jaar en 1 maal per 10 jaar. Dit is weergegeven in tabel 33. Hoewel tijdens de laatste twee perioden de diepe grondwaterstand tot in de zodelaag stijgt en ondiepe afvoer optreedt, is bij de berekening aangenomen dat de grondwaterstand tot het maaiveld kan stijgen en uitsluitend diepe afvoer plaatsvindt. Deze waarden zijn tussen haakjes geplaatst.

De beide ontwateringscriteria blijken weinig te verschillen. Uit de afvoersnelheid op de verschillende tijdstippen kan de dagelijks afgevoerde hoeveelheid worden berekend. Een afgevoerde hoeveelheid van meer dan 10 mm/dag wordt bereikt op de tweede dag van de neerslagperiode die een overschrijdingskans van 1 maal per 5 jaar heeft, en op de tweede en derde dag van de neerslagperiode die een overschrijdingskans van 1 maal per 10 jaar heeft. De totale afgevoerde hoeveelheid in zeven dagen van de verschillende neerslagperioden, waarin respectievelijk 45, 53, 65 en 75 mm neerslag valt, bedraagt gemiddeld voor beide ontwateringscriteria 38, 46, 55 en 64 mm. In verband met het veelvuldig voorkomen van ondiepe afvoer is de afvoersnelheid niet berekend bij de ontwateringscriteria met een afvoersnelheid van 2, 3 en 5 mm/dag en een potentiaalverschil van 70 cm. De afgevoerde hoeveelheid in zeven dagen zal in deze gevallen groter zijn door de geringere berging en bufferende werking van het profiel.

Om na te gaan, in hoeverre bij verschillende ontwateringscriteria een grondwaterstands daling na een neerslagperiode in het voorjaar optreedt, is het grondwaterstands-

TABEL 33. De diepe afvoersnelheid in mm/dag tijdens neerslagperioden in november met een overschrijdingskans van 1 maal per jaar, 1 maal per 2 jaar, 1 maal per 5 jaar en 1 maal per 10 jaar voor de ontwateringscriteria met een afvoersnelheid van resp. 7 en 9 mm/dag (I en II) en een potentiaalverschil van 70 cm. Bij de tussen haken geplaatste waarden is de diepe grondwaterstand gestegen tot in de zodelaag

Tijd in dagen	1 maal per jaar		1 maal per 2 jaar		1 maal per 5 jaar		1 maal per 10 jaar	
	I	II	I	II	I	II	I	II
0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
1	6,7	7,4	8,5	9,5	(10,8)	12,1	(12,1)	(13,7)
2	6,6	7,2	7,4	7,9	(7,8)	8,3	(11,0)	(12,0)
3	6,1	6,6	6,6	6,8	(8,8)	9,3	(9,3)	(9,7)
4	5,3	5,5	6,3	6,4	(7,7)	7,9	(9,2)	(9,5)
5	5,0	5,1	6,2	6,2	(7,4)	7,5	(9,0)	(9,2)
6	4,6	4,6	5,9	5,8	7,0	7,0	(7,6)	7,4
7	4,4	4,4	5,7	5,6	6,8	6,7	7,0	6,7
8	3,3	3,1	4,0	3,6	4,7	4,2	4,8	4,2
9	2,9	2,6	3,4	2,9	3,8	3,3	3,9	3,3
10	2,6	2,3	2,9	2,5	3,2	2,7	3,3	2,7
11	2,4	2,2	2,6	2,3	2,8	2,4	2,9	2,4
12	2,2	2,1	2,4	2,2	2,5	2,2	2,6	2,2
13	2,1	2,0	2,2	2,1	2,3	2,1	2,4	2,1
14	2,0	2,0	2,1	2,0	2,1	2,0	2,2	2,0
15	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,1	2,0
16	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Time in days	I	II	I	II	I	II	I	II
	Once per year		Once per 2 years		Once per 5 years		Once per 10 years	

TABEL 33. The rate of deep discharge in mm/day during precipitation periods in November, which may be expected once per year, once per 2 years, once per 5 years and once per 10 years, for the drainage criteria with a rate of discharge of resp. 7 and 9 mm/day (I and II) and a potential difference of 70 cm. The values placed between brackets indicate a ground-water level risen into the turf layer

verloop berekend voor de neerslag tijdens de zevendaagse periode in april, die 1 maal per jaar bereikt of overschreden wordt. Hierbij is verondersteld, dat de verdamping 1 mm/dag bedraagt, dat in de voorafgaande en volgende periode de dagelijkse neerslag gelijk is aan de verdamping en dat het peil in de open watergang 0,90 m -mv bedraagt. Het grondwaterstandsverloop is weergegeven in figuur 24 g. Hieruit blijkt, dat naarmate de afvoersnelheid van het ontwateringscriterium lager is, het grondwaterstandsniveau na het einde van de zevendaagse periode hoger is. Ondiepe afvoertreedt bij geen der ontwateringscriteria op, daar ook bij het minst strenge ontwateringscriterium de berging van de grond voldoende is door het lage niveau bij het begin van de periode. Bij het ontwateringscriterium met een afvoersnelheid van 0,5 mm/dag en een potentiaalverschil van 70 cm bedraagt de grondwaterstandsval in 13 dagen na

FIG. 24g. Idem, tijdens de neerslag die in een zevendaagse periode 1 maal per jaar in april bereikt of overschreden wordt, nl. op de achtereenvolgende dagen 10; 5; 4; 4; 4; 3 en 3 mm/dag, verminderd met een verdamping van 1 mm/dag, terwijl in de voorafgaande en volgende periode de dagelijkse neerslag gelijk is aan de verdamping. Het peil in de open watergang bedraagt 0,90 m -mv. De ontwateringscriteria voldoen aan een diepe afvoersnelheid van 0,5; 1; 2; 3; 5; 7; 9 en 11 mm/dag en een potentiaalverschil van 70 cm in stationaire toestand

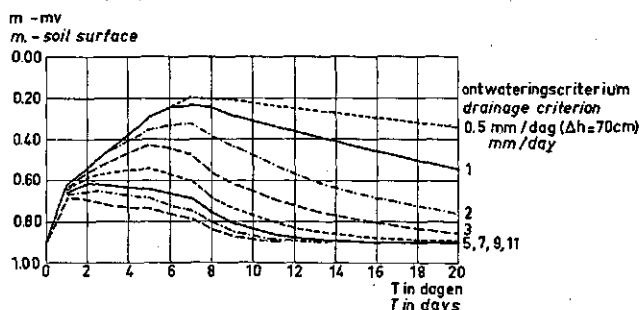


FIG. 24g. The same as figure 24a, in case of a seven-day's precipitation period, which may be expected once per year in April, the precipitation being 10; 5; 4; 4; 4; 3 and 3 mm/day, reduced with an evapotranspiration of 1 mm/day, while in the preceding and following period the daily precipitation equals the evapotranspiration. The water level in the ditch or tile line is kept at 0.90 m. below surface. The drainage criteria are conforming to a rate of deep discharge of 0.5; 1; 2; 3; 5; 7; 9 and 11 mm/day and a potential difference of 70 cm. for steady state flow

het einde van de zevendaagse periode 15 cm en zal de verdamping, wanneer deze in het voorjaar toeneemt, een sterkere invloed op de grondwaterstandsvaling hebben dan de afvoer naar de open watergang.

Wanneer in de zomer infiltratie wordt toegepast door het polderpeil te verhogen, bedraagt voor de ontwateringscriteria met afvoersnelheden van 11, 9, 7, 5, 3, 2, 1 en 0,5 mm/dag en een potentiaalverschil van 70 cm, de infiltratie per 10 cm verschil tussen polderpeil en grondwaterstand respectievelijk 1,6; 1,3; 1,0; 0,7; 0,4; 0,3; 0,15 en 0,07 mm/dag. Tijdens infiltratieproeven in de zomer van 1957 en 1958 bleek op de drainageproefvelden een stijging van de grondwaterstand op te treden, die geringer was naarmate het ontwateringscriterium van de objecten aan een lagere afvoersnelheid bij eenzelfde potentiaalverschil voldeed. Uit het potentiaalverschil op de gedraïneerde objecten kon een aanvoer van 1 à 2 mm/dag afgeleid worden.

Wanneer men als infiltratie-eis stelt een grondwaterstand van 0,60 m -mv en een aanvoer van 1 à 1,5 mm/dag, dan kan dit op het gemiddelde komgrondprofiel bereikt worden met drainafstanden van 19 à 25 m en een polderpeil van 0,50 m -mv. Een dergelijk gemiddeld polderpeil betekent bij plaatsing van stuwen om de 20 à 30 cm hoogteverschil in het maaiveld, een peil ter plaatse van de stuw van 0,35 à 0,40 m -mv. Een hoger peil ter plaatse van de stuw zal waarschijnlijk niet kunnen worden toegepast in verband met de maaiveldverschillen op korte afstand en een minimale ontwateringsdiepte. Wanneer hogere eisen aan de infiltratie gesteld worden, kan hieraan bij deze drainafstanden niet worden voldaan en moeten kleinere afstanden worden toegepast.

3. DE KEUZE VAN HET ONTWATERINGSSYSTEEM

In de vorige paragraaf is gebleken, dat het verschil in ontwateringssysteem gelegen is in de wijze waarop de afvoer plaatsvindt en in de daarbij optredende grondwaterstanden. Bij een ontwatering door sloten en drains die in de goed doorlatende ondergrond gelegen zijn, vindt de afvoer overwegend door de slecht doorlatende laag en de goed doorlatende ondergrond plaats en blijft de grondwaterstand in het algemeen tijdens een periode met overvloedige neerslag onder de zodelaag of bouwvoor en daalt daarna snel. In een periode van vochttekort tijdens het groeiseizoen is bij drainafstanden van 19 tot 30 m op het gemiddelde komgrondprofiel een aanvoer van 1,6 tot 0,7 mm/dag mogelijk per 10 cm verschil tussen polderpeil en grondwaterstand. Bij een ontwateringssysteem door sloten en greppels waarbij de afvoer overwegend door de zodelaag plaatsvindt, stijgt de grondwaterstand tijdens een periode met een neerslagoverschot tot in de zodelaag of bouwvoor en daalt na afloop langzaam. Daar het polderpeil niet zo hoog zal zijn dat aanvoer door de greppels mogelijk is, is bij slootafstanden van 40 tot 100 m slechts een aanvoer van 0,4 tot 0,7 mm/dag mogelijk per 10 cm verschil tussen polderpeil en grondwaterstand.

Het verschil in grondwaterbeheersing kan zowel van invloed zijn op de groei van het gewas als op de beweidbaarheid van het grasland en de bewerkbaarheid van het bouwland. Wat het verschil in de groei van het gewas betreft, kan de orde van grootte berekend worden uit de gegevens van het grondwaterstandsproefveld op komgrond die door MINDERHOUD (18) vermeld worden. Dit zal geschieden voor de twee ontwateringscriteria, die voor het gemiddelde komgrondprofiel een op 25 m afstand gedraineerd perceel en een begreppeld perceel met een slootafstand van 100 m betreffen.

Bij het grasland zal zowel een polderpeil van 0,90 m -mv gedurende het gehele jaar verondersteld worden, als een polderpeil dat van half mei tot half augustus tijdens de 2^e, 3^e en 4^e snede 0,50 m -mv bedraagt en in de overige tijd 0,90 m -mv. In het tweede geval kan op het gedraineerde perceel een grondwaterstandsverhoging ten gevolge van het hoge zomerpeil verwacht worden, doch op het begreppelde perceel niet. Op grond van de waarnemingen op soortgelijke percelen wordt aangenomen, dat tijdens het groeiseizoen van de jaren 1955 en 1957 de grondwaterstand op het begreppelde perceel daalde van 0,30 tot 1,00 m -mv en op het gedraineerde perceel zonder infiltratie van 0,90 tot 1,00 m -mv en met infiltratie steeg van 0,90 tot 0,60 m -mv. Tijdens het groeiseizoen van 1954 en 1956 daalde de grondwaterstand op het begreppelde perceel van 0,30 tot 0,70 m -mv om vervolgens weer tot 0,30 m -mv te stijgen en varieerde de grondwaterstand op het gedraineerde perceel zonder infiltratie tussen 0,90 en 0,70 m -mv, maar steeg bij infiltratie eerst tot 0,60 en later tot 0,30 m -mv. De gegevens van MINDERHOUD hebben namelijk betrekking op twee jaren met een droge periode in de zomer, namelijk 1955 en 1957, en op twee jaren met een natte periode in de zomer, namelijk 1954 en 1956.

In tabel 34 is het resultaat van de berekening weergegeven. De neerslag en het opbrengstverschil per 10 cm grondwaterstandsverlaging zijn bepaald als het gemiddelde van elk tweetal jaren, waarvoor de gegevens werden ontleend aan MINDERHOUD (18).

TABEL 34. Het opbrengstverschil op grasland tussen een begreppeld en een gedraineerd perceel, waarvan de ontwateringscriteria respectievelijk voldoen aan een afvoersnelheid van 0,5 en 7 mm/dag bij een potentiaal verschil van 70 cm, in de jaren 1955 en 1957 met een droge periode in de zomer, en in de jaren 1954 en 1956 met een natte periode in de zomer. De neerslag en het opbrengstverschil per 10 cm grondwaterstandsverlaging, zijn ontleend aan MINDERHOUD (18). Het grondwaterstandsverloop gedurende het groeiseizoen is gebaseerd op waarnemingen van soortgelijke percelen

Jaar	Suede	Neerslag in mm	Opbrengstverschil in kg/ds/are per 10 cm grondwaterstandsverlaging	Grondwaterstand in cm -mv				Meeropbrengst van het gedrai- neerde perceel in kg/ds/are	
				gedraineerd perceel	begreppeld perceel	zonder in- filtratie	zonder in- filtratie	met infiltratie	zonder infiltratie
				met infil- tratie	zonder in- filtratie				
1955 en 1957	1	44	+ 0,22	90	90	50	50	+ 0,9	+ 0,9
	2	65	- 0,46	60	90	70	70	+ 0,5	- 0,9
	3	34	- 0,55	60	90	90	90	+ 1,6	0,0
	4	70	- 0,58	60	100	100	100	+ 2,3	0,0
	5	68	- 0,50	90	100	100	100	+ 0,5	0,0
Totaal								+ 5,8	0,0
1954 en 1956	1	34	+ 0,30	90	90	50	50	+ 1,2	+ 1,2
	2	50	+ 0,14	60	90	70	70	- 0,1	+ 0,3
	3	72	+ 0,05	50	90	50	50	0,0	+ 0,2
	4	157	+ 0,76	30	70	30	30	0,0	+ 3,0
	5	102	+ 0,53	80	80	30	30	+ 2,6	+ 2,6
Totaal								+ 3,7	+ 7,3
Year	Cut	Precipitation in mm.	Difference in yield in kg. dry matter/are per 10 cm. fall of the ground-water level	with sub- irrigation	without sub- irrigation	with sub- irrigation	without sub- irrigation	with sub-irrigation	without sub-irrigation
				tile-drained parcel	parcel with furrows	parcel with furrows	parcel with furrows	Yield increase of the tile-drained parcel in kg. dry matter/are	
				Ground-water level in cm. below surface					

TABEL 34. The difference in yield of grassland between a parcel with furrows and a tile-drained parcel, of which the drainage criteria are conforming to a rate of deep discharge of resp. 0.5 and 7 mm/day and a potential difference of 70 cm., in the years 1955 and 1957 with a dry period during summer, and the years 1954 and 1956 with a wet period during summer. The precipitation and the difference in yield per 10 cm. fall of the water table, have been taken from MINDERHOUD (18). The change in the water table during the growing period has been based on observations from similar parcels

Hierbij is de 5^e snede van 1957 in verband met de zware neerslag buiten beschouwing gelaten. Daar het opbrengstverschil per 10 cm grondwaterstandsverlaging afgeleid is uit de resultaten van de objecten met een gedurende het gehele jaar constante grondwaterstand, terwijl in dit geval de grondwaterstand niet constant is, worden hierdoor wellicht te grote opbrengstverschillen berekend, in het bijzonder in het geval van infiltratie. Hoewel de berekening niet meer dan een orde van grootte kan aangeven, blijkt hieruit dat in droge jaren bij een laag polderpeil geen opbrengstverschil optreedt, daar het ongunstige effect van een hogere grondwaterstand in de eerste snede gecompenseerd wordt door het gunstige effect in de volgende snede, maar dat bij een hoog polderpeil tijdens de 2^e, 3^e en 4^e snede de opbrengst op het gedraineerde perceel verhoogd wordt. In natte jaren daarentegen wordt bij een laag polderpeil een gunstige invloed op het gedraineerde perceel ondervonden en levert een hoog polderpeil geen grotere opbrengst op. Bij een produktieniveau, dat in deze jaren gemiddeld 92 kg droge stof/are bedroeg, bij een stikstofbemesting van 70 kg/ha, liggen de opbrengstverschillen in een orde van grootte van 0 tot 10 %.

Wat de akkerbouwgewassen op het grondwaterstandsproefveld betreft, blijkt de sterkste opbrengstreactie op te treden bij de granen, waar een lagere grondwaterstand in elk jaar een opbrengstverhoging ten gevolge heeft. Wanneer men voor het bouwland alleen uitgaat van een laag polderpeil gedurende het gehele jaar en de groeiperiode van de granen gelijk stelt aan de periode van de 1^e tot de 4^e snede op grasland, dan bedraagt volgens tabel 33 het grondwaterstandsverschil in 1955 en 1957 ongeveer 20 cm en in de jaren 1954 en 1956 ongeveer 30 cm. De gemiddelde grondwaterstanden op het begreppelde en het gedraineerde perceel komen dan ongeveer overeen met die van de vakken 65 en 95 van het grondwaterstandsproefveld. Bij een stikstofbemesting van 50 tot 90 kg N/ha betekent dit een verschil in de korrelopbrengst van granen van 10 tot 15 %. Ook hierbij is het de vraag, of men het effect van een constante grondwaterstand gelijk mag stellen aan die van een waterstand, die in het begin van het groeiseizoen hoger is en daarna lager is dan dit niveau. Het opbrengstverschil ligt in dezelfde orde van grootte als dat op het grondwaterstandsproefveld op Dollard-klei te Nieuw-Beerta (11). Voor de overige gewassen zal het verschil kleiner zijn.

Wanneer de slootafstand op het gemiddelde komgrondprofiel kleiner is dan in de bovengenoemde gevallen, zal ook het opbrengstverschil voor grasland en bouwland afnemen, terwijl drainafstanden van 19 tot 30 m nauwelijks een verschil van betekenis in dit opzicht zullen uitmaken.

De beweidbaarheid van het grasland is zowel van de ontwateringstoestand als van de veebezetting afhankelijk. Naarmate de veebezetting groter wordt, worden hogere eisen aan de ontwateringstoestand gesteld om vertrapping van de zodelaag en plasvorming te voorkomen. Tot een zekere grens zal de ontwateringstoestand op begreppelde percelen voldoende zijn, terwijl bij een hogere veebezetting deze alleen door drainage en een laag polderpeil bereikt kan worden. De grens in dit opzicht kan op grond van praktijkervaring globaal worden aangegeven. Op begreppelde komgrondpercelen, die in een goede gebruikstoestand verkeren, wordt in doorsnee een veedichtheid van 1 à 1,5 stuks omgerekend grootvee per ha aangehouden. Op het proefbedrijf „De Hardepoel”, is de ontwateringstoestand ongeveer vergelijkbaar met die op be-

greppelde percelen, daar de drains door een te geringe diepte als afgedekte greppels beschouwd kunnen worden, zij het dat een ronde akkerligging ontbreekt. Een veedichtheid van circa 2 stuks omgerekend grootvee per ha geeft hier in natte perioden aanleiding tot vertrapping van de zodelaag en plasvorming. Op de gedraineerde bedrijven in de ruilverkavelingsgebieden Maas en Waal-West en Bommelerwaard-Oost, waar de veedichtheid circa 2 stuks omgerekend grootvee per ha bedraagt, komen vertrapping en plasvorming van enige betekenis niet voor bij een polderpeil van ongeveer 0,70 m -mv en lager, behalve in uitzonderingsgevallen zoals bij herinzaai op langdurig als bouwland gebruikte percelen. De drainage, die oorspronkelijk berekend werd op een afvoersnelheid van 7 mm/dag in stationaire toestand bij een potentiaalverschil van 30 à 40 cm, voldoet hier in het algemeen aan een afvoersnelheid van 7 tot 11 mm/dag bij een potentiaalverschil van 70 cm, daar de *KD*-waarde kleiner en de radiale weerstand groter is dan oorspronkelijk op grond van de boorgatenmethode werd aangenomen. Op een drainageproefveld in de Tielerwaard, waarvan de proefveldhouder op zijn gehele bedrijf een veebezetting van ongeveer 2 stuks omgerekend grootvee per ha aanhield, werd geen hinder van plasvorming ondervonden op de objecten, waarvan het ontwateringscriterium voldeed aan een afvoersnelheid van 7 mm/dag en een potentiaalverschil van 70 cm en het polderpeil 0,70 tot 0,90 m -mv bedroeg, en gaven minder scherpe ontwateringscriteria aanleiding tot een minder goede ontwateringstoestand.

De genoemde gegevens kunnen slechts een globale indruk geven, terwijl er in dit opzicht evenmin een scherpe grens voor het ontwateringscriterium getrokken kan worden als ten aanzien van de opbrengst. Op grond hiervan kan wel gesteld worden, dat een veebezetting van circa 2 stuks omgerekend grootvee per ha, die op begreppelde percelen als te hoog wordt beschouwd, mogelijk is op gedraineerde percelen met een ontwateringscriterium, dat voldoet aan een afvoersnelheid van 7 mm/dag of meer en een potentiaalverschil van 70 cm, en bij een polderpeil van 0,70 m -mv of lager. Men dient er rekening mee te houden, dat de veebezetting niet onbeperkt kan worden opgevoerd door het stellen van steeds hogere ontwateringscriteria, daar zelfs op vak 140 van het grondwaterstandsproefveld, bij rantsoenbeweiding in de natte zomer van 1954 plasvorming optrad. In paragraaf III, 3b werd reeds gewezen op de vertrapping en de geringe doorlaatfactor van de zodelaag ten gevolge van beweiding bij een grondwaterstand van 0,40 m -mv. De ongunstige invloed, die een hoog polderpeil in natte perioden ten aanzien van de beweidbaarheid heeft, kan groter zijn dan die ten aanzien van de grasgroei.

Evenmin als op gedraineerde graslandpercelen in de ruilverkavelingsgebieden hinder werd ondervonden bij de beweiding, was dit met de bewerkbaarheid van de bouwlandpercelen het geval. Op het drainageproefveld in het Hollanderbroek bleef de bouwvoor op de objecten met een ontwateringscriterium dat aan een afvoersnelheid van minder dan 7 mm/dag en een potentiaalverschil van 70 cm voldeed, langer nat dan op de overige objecten.

Wat het verschil in grondwaterbeheersing tussen een gedraineerd en begreppeld perceel betreft, ligt het opbrengstverschil op grasland dus in een orde van grootte van 0 tot 10%, afhankelijk van de weersomstandigheden, terwijl dit op bouwland ongeveer

10% kan bedragen. Bij een ontwateringscriterium, dat voldoet aan een afvoersnelheid van 7 mm/dag of meer en een potentiaalverschil van 70 cm, d.w.z. bij een drainafstand van 25 m of minder op het gemiddelde komgrondprofiel, kan de beweidbaarheid van het grasland, met een veebezetting van circa 2 stuks omgerekend grootvee per ha, en de bewerkbaarheid van het bouwland voldoende genoemd worden. Verder verschillen beide ontwateringssystemen nog in het landverlies en de mogelijkheid tot mechanisatie. Wanneer men het landverlies bij begreppeling stelt op 0,5 m² per m greppellengte, dan bedraagt dit bij een greppelafstand van 12,5 m en een perceelsbreedte van 50 à 100 m, 3 à 3,5% van de oppervlakte. Van het verschil in mogelijkheid tot mechanisatie is het moeilijk een schatting te maken.

De economische waardering van de betere grondwaterbeheersing, de landwinst en de betere mechanisatie mogelijkheid in het geval van drainage is afhankelijk van de bedrijfsomstandigheden en zal er toe leiden dat, bij intensivering van het graslandgebruik, de drainage in aanmerking komt om de begreppeling als ontwateringssysteem op grasland te vervangen. Eveneens is dit het geval, indien de oude verkavelingstoestand, waarin men beschikt over grasland met een van nature verschillende ontwateringstoestand, namelijk op stroomruggrond en op komgrond, vervangen wordt door een nieuwe toestand, waarin het gehele bedrijf op komgrond is gelegen. In het laatste geval kan ook een gedeeltelijke drainage van het bedrijf aanbeveling verdienen. In verband met de grote betekenis van de bewerkbaarheid zal op bouwland drainage steeds de voorkeur verdienen boven begreppeling.

Bij toepassing van drainage als ontwateringssysteem met een criterium, dat voldoet aan een afvoersnelheid van 7 à 9 mm/dag en een potentiaalverschil van 70 cm, bedraagt de drainafstand 22 à 25 m bij een draindiepte van 0,90 m -mv op het gemiddelde komgrondprofiel. Wanneer de *KD*-waarde en de radiale weerstand hiervan afwijken kan de drainafstand groter of kleiner zijn. De bepaling van een andere afstand is bij het geven van een drainage-advies echter niet mogelijk met de grondwaterstands-debietmethode, daar deze bezwaarlijk op niet gedraineerde percelen valt toe te passen, terwijl de boorgatenmethode vaak tot te hoge uitkomsten kan leiden, zoals in paragraaf III, 1b besproken is. Ook indien de boorgatenmethode juiste resultaten zou opleveren, is deze methode voor de adviesgeving op komgrond niet geschikt in verband met de grote spreiding van de waarnemingen en het daardoor vereiste aantal waarnemingen.

Wanneer men tussen twee objecten bij een verschil van 1 op 4 in *KD*-waarde, dat wil zeggen 1 op 2 in drainafstand een verschil in deze richting met 5% risico in 95% van de gevallen wil vaststellen, zijn bij een standaardafwijking van de enkele waarneming, die per object op 50% van het gemiddelde gesteld kan worden, 7 waarnemingen per object nodig en bij een verschil van 1 op 2 in *KD*-waarde, 15 waarnemingen. Een verschil van 1 op 4 in *KD*-waarde komt voor tussen de afzonderlijke objecten van de drainageproefvelden ter grootte van circa 0,5 ha, maar slechts als uitzondering tussen de proefvelden, ter grootte van ongeveer 2 ha, zelf. Wanneer men 2 ha als de minimumoppervlakte beschouwt, waarvoor uit praktische overwegingen een afzonderlijk drainageadvies wordt gegeven, dan zijn bij het zelden voorkomende verschil van 1 op 4 in *KD*-waarde 4 waarnemingen per ha en bij het verschil van 1 op 2 in *KD*-waarde 8 waarnemingen per ha nodig om een verschil aan te tonen, hetgeen zal leiden tot hoge advieskosten.

Zowel in verband met de mogelijkheid van te hoge uitkomsten als in verband met de grote spreiding van de waarnemingen verdient de boorgatenmethode voor de adviesgeving op komgrond derhalve geen aanbeveling. In plaats daarvan kan men de drainafstand van het gemiddelde komgrondprofiel als maatstaf bij de praktische uitvoering toepassen, terwijl men hierbij rekening houdt met de mogelijke draindiepte. Indien een te lage *KD*-waarde of een te hoge radiale weerstand in dat geval blijkt te leiden tot een onvoldoende ontwateringstoestand, kan men de drainafstand later plaatselijk halveren door het tussenleggen van een drainreeks.

Deze laatste situatie zal weinig voorkomen. Uit tabel 5 blijkt, dat oppervlakten ter grootte van ongeveer 2 ha, die voor het drainage-advies als een minimum beschouwd kunnen worden, geen grote verschillen in *KD*-waarde vertonen met uitzondering van de zeer hoge waarde op het drainageproefveld in de Tielerwaard bij Hellouw. De laagste waarde bedraagt 0,6 m²/dag; hetgeen bij toepassing van een drainafstand van 22 à 25 m, een afvoersnelheid van circa 5 mm/dag en een enigszins mindere grondwaterbeheersing betekent dan op het gemiddelde komgrondprofiel. Op het drainageproefveld in het Hollanderbroek, dat zich uitstrekt over een lengte van 1200 m, blijkt een drainafstand van 25 m te voldoen, met uitzondering van een lengte van 100 m, d.w.z. minder dan 10% van de oppervlakte. Ook in de verschillende gedraineerde complexen in de ruilverkavelingsgebieden blijkt de oppervlakte, waar vanwege een lage doorlaatfactor een kleine drainafstand geadviseerd werd, niet meer dan ongeveer 10% van de oppervlakte uit te maken. Evenmin komen oppervlakten van enige omvang met een grote doorlaatfactor, zoals het drainageproefveld in de Tielerwaard bij Hellouw, vaak voor.

Wat de doorlaatfactor van de slecht doorlatende laag betreft, de spreiding hierin is volgens de bepalingen met de infiltratiemethode op korte afstand, van enige meters, gelijk aan die op grote afstand, zodat er geen reden bestaat hierin voor het drainage-advies verschillen aan te nemen. Zoals reeds eerder opgemerkt werd, wordt een hoge doorlaatfactor als gevolg van het voorkomen van ijzerconcreties in de slecht doorlatende laag als een uitzondering beschouwd.

Een variatie in de dikte van de slecht doorlatende laag is van weinig betekenis, mits drainage in de goed doorlatende ondergrond mogelijk is.

Wat de bergingscoëfficiënt betreft, lijkt een afwijking van enige betekenis ten opzichte van de gemiddelde waarde niet waarschijnlijk. De berging vindt voor het grootste gedeelte plaats in de zodelaag en de slecht doorlatende laag, waarvan de *pF*-krommen op 17 profielen geen duidelijke verschillen opleverden. Evenmin blijkt uit tabel 26 een groot verschil ten opzichte van het gemiddelde voor objecten ter grootte van 0,5 ha, terwijl er vrijwel geen verschil is tussen het proefveld ter grootte van 2 ha en het gedraineerde perceel ter grootte van 3 ha.

De drainlengte per ha is in sterke mate afhankelijk van de praktische omstandigheden, namelijk van de kavelbreedte in verband met de mogelijkheid om van de invloed van de sloot gebruik te maken en van de greppelafstand, indien het gewenst is de drainage in de oude greppels uit te voeren. De gunstigste situatie doet zich voor, wanneer de perceelsbreedte 50 m en de greppelafstand 12,5 m bedraagt. Bij een drainage in de middelste greppel bedraagt de afstand tussen sloot en drain 25 m, en de drainlengte 200 m/ha. Wanneer de perceelsbreedte 100 m bedraagt en de greppelafstand 15 m, dan zal drainage in

elke greppel aanbeveling verdienen, daar een drain om de andere greppel op 30 m afstand aan de ruime kant is. In dat geval bedraagt de drainlengte circa 600 m/ha.

De landwinst in het geval van drainage is ook afhankelijk van de mogelijkheid om de greppels op te vullen. De gunstigste situatie doet zich voor, indien de greppels van niet te grote diepte zijn en door de grondbewerking bij de herinzaai van grasland opgevuld kunnen worden.

4. SAMENVATTING

Van het gemiddelde komgrondprofiel wordt de *KD*-waarde van de goed doorlatende laag op 1 m²/dag gesteld, de radiale weerstand bij ligging van de sloten en drains in de goed doorlatende ondergrond op 0,5 dag/m, de doorlaatfactor resp. dikte van de slecht doorlatende laag op 0,05 m/dag en 0,50 m, de bergingscoëfficiënt van het gehele profiel op 0,035, terwijl voor de ondiepe stroming door de zodelaag aangenomen wordt, dat deze overwegend in de bovenste 10 cm plaats vindt.

Voor dit komgrondprofiel werd het grondwaterstandsverloop tijdens perioden met overtollige neerslag berekend bij verschillende ontwateringscriteria en een peil van 0,90 m -mv in de sloten en drains. Bij ontwateringscriteria, die voldoen aan een afvoersnelheid van 7 mm/dag of meer in stationaire toestand en een potentiaalverschil van 70 cm, d.w.z. een afstand van 25 m of minder, treedt in hoofdzaak diepe afvoer op en daalt de grondwaterstand na een regenperiode snel. De ontwatering kan geschieden door een systeem van sloten en drains. Bij infiltratie in de zomer is een aanvoer van 1 mm/dag of meer mogelijk per 10 cm verschil tussen polderpeil en grondwaterstand. Bij ontwateringscriteria, die voldoen aan een afvoersnelheid van 2 mm/dag of minder in stationaire toestand en een potentiaalverschil van 70 cm, d.w.z. een afstand van 50 m of meer, overweegt de ondiepe afvoer en daalt de grondwaterstand na afloop van een regenperiode langzaam. Daar in dat geval voor de ondiepe afvoer een voorziening moet worden getroffen, vindt de ontwatering plaats door een systeem van sloten en greppels. Ontwateringscriteria met een afvoersnelheid van 5 en 3 mm/dag in stationaire toestand en een potentiaalverschil van 70 cm, d.w.z. een afstand van 30 en 40 m, nemen een tussenpositie in.

Door het verschil in grondwaterbeheersing kan een opbrengstverschil optreden, dat op grasland in een orde van grootte van 0 tot 10% ligt en op bouwland circa 10% bedraagt. Bij ontwateringscriteria met een afvoersnelheid van 7 à 9 mm/dag en een potentiaalverschil van 70 cm is de beweidbaarheid van grasland met een veebezetting van circa 2 stuks omgerekend grootvee per ha en de bewerkbaarheid van het bouwland goed. De economische waardering hiervan, van het verschil in landwinst en mechanisatiemogelijkheid en daarmee de toepassing van drainage of begreppeling als ontwateringssysteem, is afhankelijk van de bedrijfsomstandigheden.

Bij toepassing van drainage als ontwateringssysteem met een ontwateringscriterium, dat voldoet aan een afvoersnelheid van 7 à 9 mm/dag en een potentiaalverschil van 70 cm, bedraagt de drainafstand op het gemiddelde komgrondprofiel bij een draindiepte van circa 1,00 m -mv, 22 à 25 m. Daar de boorgatenmethode voor de drainageadviesgeving op komgrond niet geschikt is, kan deze afstand als maatstaf bij de praktische uitvoering worden toegepast.

SUMMARY

GROUND-WATER FLOW IN BASIN CLAY SOIL AND THE DETERMINATION OF SOME HYDROLOGICAL FACTORS IN RELATION WITH THE DRAINAGE SYSTEM

CHAPTER I. INTRODUCTION

In connection with land reallocation and water management projects in the region between the large rivers in the Netherlands, involving an extensive area of basin clay soil, an investigation has been made into the ground-water flow in basin clay soil and the drainage system that is to be used there. In general two drainage systems present themselves for consideration, namely furrow drainage and tile drainage. On basin clay soil furrow drainage has of old been the rule. The possibility of using tile drainage has been doubted on account of the low hydraulic conductivity of the basin clay profile. It has, however, been pointed out by VISSER (28) and HOOGHOUT (14) that below the low-permeable layer a high-permeable layer is present in the basin clay profile and that this should provide a possibility for tile drainage.

A number of experimental fields have been laid out, while in the land reallocation areas 'Land van Maas en Waal-West' and 'Bommelerwaard-Oost' the parcels of the reallocated farms on basin clay soils have been provided with tile drainage. Figure 1 shows the location of the various areas where the investigations have been carried out.

CHAPTER II. GROUND-WATER FLOW IN BASIN CLAY SOILS

The basin clay profile is characterized by a high-permeable surface layer, below that, a low-permeable layer and a high-permeable subsoil, see figure 2. In this soil profile, a deep discharge in vertical direction through the low-permeable layer and in horizontal direction through the high-permeable subsoil takes place. A shallow discharge in horizontal direction will occur through the surface layer. Surface run-off may occur under special conditions.

The occurrence of shallow discharge is determined by the relation between the precipitation rate and the infiltration capacity in the low-permeable layer. When the ground-water level is situated below the top of the low-permeable layer, the infiltration takes place in non-saturated soil, the infiltration capacity being in excess of (see eq. 2.1), or practically equal to (see eq. 2.2) the hydraulic conductivity of the low-permeable layer. When, however, the ground-water level has risen to the top of the low-permeable layer the infiltration capacity becomes equal to the rate of discharge of the drainage system in the high-permeable subsoil. The lower the ground-water level and the potential in the high-permeable subsoil is at the start of the precipitation period, the longer the precipitation is bound to infiltrate into a non-saturated soil. This results in a discharge that will take place to a greater extent through the low-permeable layer and the high-permeable subsoil. For the ratio between deep- and shallow discharge, the potential in

the high-permeable layer is consequently of importance together with the precipitation rate and the hydraulic conductivity and thickness of the low-permeable layer. This potential depends on the spacing of the ditches or tile lines, the water level in them and their depth in respect to the high-permeable subsoil, and the KD -value of the high-permeable subsoil.

For the steady-state ground-water flow, the equations 2.3 and 2.4 as proposed by HOOGHOUT (13), can be used. Their application is, however, restricted on a basin clay profile, since the bottom of the ditch or the tile line will have to be situated in the high-permeable subsoil to make them applicable. The case is that in these equations the radial potential difference is accounted for by the assumption of an equivalent layer, the thickness of which depends on the wet perimeter of the ditch or of the tile line, on the spacing between the ditches or tile lines and the depth of the impermeable substratum, and not on the hydraulic conductivity of the layer around the ditch or the tile line when a heterogeneous soil profile is present. This restriction does not apply to the equations derived by ERNST (2) (equations 2.5; 2.6; 2.7; 2.8), in which the total potential difference for the ground-water flow is divided in potential differences for respectively the vertical, horizontal and radial flow. The radial resistance can be calculated with equation 2.9, when the ditch or tile line is situated in a homogeneous soil profile, and with equation 2.10 in the case of a ditch or a tile line being situated in a low-permeable layer above a well-permeable subsoil (w_0 can be determined by means of a graph, see appendix 1). If the wet perimeter below the water level in the ditch or the tile line, is less than al/K , it must be increased by the so-called seepage zone, above the water level in the ditch or the tile line. In cases like this, the radial potential difference can be calculated with equation 2.11.

In table 1 and figure 4 has been calculated, with the aid of the equations of ERNST, to what extent the depth of the drainage system in a basin clay profile will affect the vertical, horizontal and radial potential difference and its effect on the spacing of the ditches or the tile lines at a given criterion for the rate of deep discharge and for the ground-water level. As long as the drainage system is not situated in the layer with the highest hydraulic conductivity, a greater depth of the drainage system has in a basin clay profile a greater influence on the spacing than it has in the case if a homogeneous soil profile, as both the total potential difference and the relative amount of the horizontal potential difference will increase. In the case of a drainage system by means of ditches and tile lines, the bottom of the drainage system should be situated in the high-permeable subsoil if, with reasonable drain spacings, there is to be an adequate deep discharge. When, however, the bottom of the drainage system is situated in the low-permeable layer, the discharge will mainly take place as a shallow discharge by reason of the very high resistance for the deep ground-water flow. In such a case a drainage system by means of ditches and tile lines may scarcely be expected to result in a lower ground-water level than can be obtained by means of drainage by ditches and furrows.

The equations 2.12, 2.13, 2.14, 2.15 and 2.16, as proposed by KRAIJENHOFF VAN DE LEUR (15), can be applied to the non-steady state ground-water flow. During the drainage process the constant relation between the rate of discharge and the potential difference, is only present during the tail recession, for which eq. 2.15 is valid. Instead of

the value $K_3 D_3$, the value $K_3 d$ can be used. This latter value makes allowance for the radial resistance and may be calculated by means of equation 2.15, provided the relation between the rate of discharge and the potential difference during the tail recession has been established beforehand (figure 23). The coefficients c_1 and c_2 depend on the duration of the percolation flow and on the reservoir-coefficient. They can be taken from the tables given in appendix 2. A second possibility to calculate the non-steady state ground-water flow is provided by the equations 2.17, 2.18 and 2.19, derived by DE ZEEUW and HELLINGA (10). For these equations it is assumed that a constant relation between the rate of discharge and the potential difference exists in accordance with equation 2.4, during the whole period of the drainage process. In table 2, the rate of deep discharge and the potential difference in the high-permeable subsoil has been calculated with the equations 2.12 and 2.13, as well as with the equations 2.17 and 2.18. From this table it appears that use of the equations 2.12 and 2.13 result initially in a higher and subsequently in a lower rate of discharge, than is obtained with the equations 2.17 and 2.18. The potential difference is at first lower and later on practically equal, when comparing the results from equation 2.12 and 2.13 with those from 2.17 and 2.18. The differences between both calculations are relatively larger at a higher value of the reservoir-coefficient.

Equation 2.21 can be applied to the problem of a steady-state ground-water flow through the surface layer. For the non-steady state flow no equations can be derived in the form of 2.12 and 2.13, as the thickness of the layer in which ground-water flow takes place is not a constant one. In case the ground-water level in the surface layer has risen to a height Δh_1 above the low-permeable layer over the whole distance between the ditches, tile lines or furrows, equation 2.22 can be applied. If the surface layer is completely saturated, the maximum rate of shallow discharge can be calculated by means of equation 2.22.

CHAPTER III. DETERMINATION OF SOME HYDROLOGICAL VALUES

1. *The hydraulic conductivity and the thickness of the high-permeable subsoil and the radial resistance*

The potential discharge method, as described by HOOGHOUDT (12), in which the hydraulic conductivity is calculated from the relation between the ground-water level and the rate of discharge, is treated with reference to a basin clay profile. When the potential, measured in the high-permeable subsoil, is situated below the low-permeable layer and the horizontal flow in the high-permeable subsoil takes place below, as well as above, the water level in the ditch or the tile line (figure 8a), equation 3.1 can be applied to calculate the rate of deep discharge. When the horizontal flow above the level of the ditch or tile line can be neglected, equation 3.1 changes into equation 3.2. A rectilinear relation exists between the potential difference in the high-permeable subsoil and the rate of deep discharge according equation 3.3. If, however, the horizontal flow below the water level of the ditch or tile line is negligible, equation 3.1 changes into equation 3.4. Now a curvilinear relation exists between the potential difference in the high-permeable subsoil and the rate of deep discharge according

equation 3.5. If none of the two terms of equation 3.1 can be neglected, the relation between the potential difference in the high-permeable subsoil and the rate of deep discharge is also curvilinear. When the potential, measured in the high-permeable subsoil, rises into the low-permeable layer, then the existing curvilinear relation will from that moment assume a more and more rectilinear aspect. A distinction can be made for the radial potential difference being smaller or being larger than the thickness of the high-permeable subsoil above the water level of the ditch or the tile line. In the first case (figure 8b), equation 3.6 can be applied; in the second case (figure 8c), equations 3.7 and 3.8 must be used. It may be deduced, therefore, from the relation between the potential difference in the high-permeable subsoil and the rate of deep discharge, to what extent the horizontal flow takes place below and above the water level of the ditch or tile line. If the relation is entirely rectilinear, the horizontal flow will occur below the water level of the ditch or tile line. When a curvilinear relation exists, the horizontal flow will occur above the level of the ditch or tile line too and the more so, the more pronounced the curvature (figure 9).

For the calculation of the hydraulic conductivity and thickness of the high-permeable subsoil, and the radial resistance, the potential difference in the high-permeable layer must be split up into the horizontal- and the radial potential difference. In case, the horizontal flow occurs both below and above the water level in the ditch or tile line and if the potential measured in the high-permeable subsoil is situated below the low-permeable layer (figure 8a), then the potential in the high-permeable subsoil between the ditches or tile lines will assume the form of an ellipse according equation 3.9. The method of figure 10a can then be applied (see for example figure 14b). If the horizontal flow above the water level in the ditch or tile line can be neglected, or if the radial potential difference is larger than the thickness of the high-permeable subsoil above the water level in the ditch or tile line (figure 8c), the potential will assume the form of a parabole according equation 3.10. Now the method of figure 10b can be used (see for example figure 14a). In the case of figure 8b, the potential will assume a parabolic form in the low-permeable layer, while it has an elliptic one in the high-permeable layer. The difference in outcome between both methods has generally proved to be insignificant.

In applying the potential discharge method, no use must be made of any observations obtained during or immediately after the precipitation period, but only of observations made during the tail recession. In this way deviations in the rate of deep discharge, due to the non-steady state flow of the drainage process and to the occurrence of shallow discharge, are prevented as much as is possible. During the tail recession, the relation between the potential difference and the rate of discharge is constant and is approximately the same as during the steady state flow.

Table 3 and 4, as well as figure 12, 13, 14, 15 and 16, illustrate the potential discharge method, the results of which are summarized in table 5. These results are compared with the data obtained with the auger hole method. On account of the oblique frequency distribution of the observations obtained with the auger hole method, with the piezometer method and with the ring sampling method (strongly deviating values in the tables 7, 8, 9 and 10, correlation of the standard deviation with the

arithmetic mean in figure 17), the geometric mean has been applied instead of the arithmetic mean. In the latter case a higher mean value is obtained (table 6 and 10).

Comparing the KD -values obtained with the potential discharge method and by means of the auger hole method, the results of both methods appear to be in good agreement as far as the drainage experimental field in the 'Maaskant', a tile-drained parcel in the 'Land van Maas en Waal' and the drainage experimental fields in the 'Tielerswaard' near Dalem and Hellouw are concerned. The first mentioned case concerns a soil profile of which the high-permeable subsoil consists of clay, containing iron concretions and humic rests, becoming gradually lighter textured with depth and in which up to a depth of at least 2.00 m. no second low-permeable layer occurs. In the second mentioned case, the high-permeable subsoil consists of clay with iron concretions, below which a second low-permeable layer of grey coloured clay without concretions and humic rests is present. In the third and fourth mentioned case, the high-permeable subsoil consists of humic and peaty clay with a relatively slight thickness (20 to 40 cm.) underlain by more or less peaty layers with a low hydraulic conductivity.

No agreement, on the other hand, appears to exist between the results of both methods as far as the drainage experimental fields in the 'Hollanderbroek' and in the 'Tielerswaard' near Asperen and Heukelum and a number of tile-drained parcels in the 'Land van Maas en Waal' are concerned. The KD -value calculated from the data obtained with the auger hole method, proved invariably to be higher than the KD -value obtained by means of the potential discharge method. In these cases, the high-permeable subsoil consisted of more or less peaty layers, in which the presence of a second low-permeable layer could not be established neither visually nor by the measurements with the auger hole method at intervals of 10 to 30 cm. Only on the drainage experimental field in the 'Hollanderbroek' a 5 to 10 cm. thick layer was found at a depth of 1.10 to 1.20 m., which gave the visual impression of being less permeable.

The horizontal stratification of the peaty layers could have caused a higher hydraulic conductivity in a horizontal than in a vertical direction, the auger hole method giving in that case a too favourable value of the hydraulic conductivity. Such a form of anisotropy could not be found, however, neither with the piezometer method (table 8) nor with the ring sampling method. It appeared, on the other hand, from measurements in subsequent layers with a thickness of 10 cm., that high and low values of the hydraulic conductivity occur alternately (table 7 and 8). A possible explanation for the difference in results from both methods may lie either in the presence of thin, low-permeable layers, with a thickness of less than 10 cm. in the peaty subsoil, or in a form of anisotropy, due to the alternative occurrence of higher and lower values of the hydraulic conductivity, which will give lower KD -values than are to be found with the auger hole method.

It is possible to calculate the values of the radial resistance, which can be obtained with the potential discharge method, by means of the equations 2.9 and 2.10, using the hydraulic conductivity measured with the auger hole method.

2. *The hydraulic conductivity of the low-permeable layer*

If an auger hole is made in the low-permeable layer to determine the hydraulic conductivity, a clogging of the large pores may reduce the hydraulic conductivity around the auger hole to such an extent, that the water level inside the hole or tube will adjust itself only after a considerable delay. For this reason, the auger hole method (table 9) and the calculation of the hydraulic conductivity from the vertical potential difference (table 11) will, as a rule, result in a too low value for the hydraulic conductivity. This holds equally true for the measuring of the hydraulic conductivity with the ring sampling method, if the upper and lower part of the sample have been cut smoothly (table 10). To maintain the natural structure as well as possible, the soil aggregates at the upper and lower part of the sample should be removed very carefully. Due to the presence of cracks and roots, very high values of the hydraulic conductivity may occur in the relatively small samples and the variation in the measurements will be great. In the determination of the hydraulic conductivity of the low-permeable layer with the auger hole method or ring sampling method, it is also better to use the geometric mean instead of the arithmetic mean.

In measuring the hydraulic conductivity by means of infiltration through a furrow or by means of an infiltrometer, none of the above objections have to be made, since the low-permeable layer is not disturbed. The hydraulic conductivity is measured on a much larger area than is the case with the other methods, making the influence of cracks and roots of less importance. The inaccuracy to which this method may give rise is caused by the difficulties in determining the boundary of the stream pattern. From measurements carried out while applying various infiltration levels in the furrow, it appeared however that this can be done with a reasonable accuracy (figure 19 and table 12).

On account of crack formation in and swelling of the soil, the hydraulic conductivity of the low-permeable layer may differ considerably in the course of the year, depending on weather conditions and moisture content. Due account of this is to be taken when determining a permanent influence of the ground-water level and of the properties of the soil profile. A permanent influence of the ground-water level on the hydraulic conductivity could until now not be established. In the case of fine iron concretions occurring in the low-permeable layer, a value of 0.2 to 0.4 m/day was found for the hydraulic conductivity. The iron accumulations in the low-permeable layer occur mostly in the form of specks, however. The degree in which these rust specks are present in the soil, was not found to have an influence on the hydraulic conductivity. With the presence of rust specks, the hydraulic conductivity of the low-permeable layer amounted to an average of 0.05 m/day.

Subsoiling offers advantages as well as disadvantages. It results in some increase of the hydraulic conductivity and, in the first few years, in higher yield of grassland during the spring and during a wet summer season. In later years this raised yield will decrease and a reverse trend will start. When subsoiling is immediately followed by the sowing of grass, it results in a more or less rough surface caused by partial subsidence of the soil where the grooves made by the subsoiler were located.

3. *The hydraulic conductivity of the turf layer*

The hydraulic conductivity of the turf layer can be measured by means of infiltration with a furrow or by means of an infiltrometer (table 15) and with the ring sampling method (table 16). In general the hydraulic conductivity will amount to 0.2 to 0.5 m/day, when the measuring or sampling takes place in a soil, of which the moisture content equals the equilibrium moisture content, and it will show a tendency to drop with depth. Trampling of the turf layer, which is correlated with such factors as ground-water level, precipitation and pasturing intensity, may be causing extremely low values, less than 0.005 m/day, of the hydraulic conductivity. A low humus content of the grassland, as a result of a prolonged former use as arable land, may also cause a similar low value of the hydraulic conductivity (table 17). In these cases, in which ponding and surface run-off usually occur during periods of rainfall, the hydraulic conductivity of the turf layer is lower than the hydraulic conductivity of the low-permeable layer and the turf layer is then the restricting factor to the vertical water flow.

4. *The storage coefficient*

In figure 20, the volume air fraction is given for various ground-water levels in a basin clay profile, assuming the moisture content of the soil equals the equilibrium moisture content. The equilibrium moisture content is defined as the moisture content at a suction pressure that corresponds with the available head above the ground-water level. A change in the ground-water level will produce a change in the moisture content of the whole soil profile, both over the depth in which this change of the ground-water level is taking place, as well as above it. The storage coefficient may be defined as the ratio of the volume of water taken up or released either by the whole profile or by the part in which the change of ground-water level takes place, and the change in ground-water level, if the moisture content before and after this change equals the equilibrium moisture content. The storage coefficient is a constant, this in contrast with the storage, which refers to the quantity of water, the profile, or any given layer, is capable to take up until complete saturation is reached.

Table 18 gives pore volume and volume air fraction at various pF -values of the mean basin clay profile, calculated from the data of 17 profiles. From this, the volume air fraction at various ground-water levels may be calculated, if the moisture content is assumed to equal the equilibrium moisture content (pF -value 1.0, 1.5 and 2.0 at respectively 10, 30 and 100 cm. above the ground-water level).

This volume air fraction is shown in figure 20, from which the storage coefficients given in table 19 have been calculated. The same has been done for two other clay soils, to make a comparison of the basin clay soil with the other clay soils possible. An objection against the above mentioned method is the fact, that it does not take in consideration the amount of air trapped below the ground-water level. This may result in finding too high values for the storage coefficient. On the other hand it does neither account for the swelling, that will occur in heavy clay soils during the laboratory procedure, which may be the cause of values that are too low. These inaccuracies apparently counterbalance each other more or less, since the result of the calculation from the pF -curve is in reasonable agreement with the results obtained with other methods.

The soil-water-air ratio has been determined on the ground-water level experimental field 'De Vlierd'. The sampling was done after a precipitation period in spring, when it might be supposed that the moisture content equals the equilibrium moisture content more or less. The fraction by volume of 'free air' (storage) has been calculated by reducing the volume air fraction with the volume fraction of air trapped below the ground-water level (table 22 and 23). The values found in this manner were in good agreement with the values found from the pF -curve.

The storage coefficient of the whole profile can also be determined from the ratio of the volume of water taken up or released by the profile, and the corresponding change in the ground-water level, if the moisture content before and after this change equals the equilibrium moisture content. The ground-water level cannot be measured, if it is situated in the low-permeable layer, by reason of the delay occurring in the piezometers placed in this layer. Since there is, however, only a small difference between the ground-water level and the potential in the high-permeable subsoil, the latter value has been used. For the determination of the storage coefficient, the tail recession period is to be preferred over the period of rise. This is done to approach as near as possible the equilibrium moisture content (table 24). The values for the storage coefficient can be calculated from the ratio of the deep discharge and the mean change in potential in the high-permeable subsoil, which is assumed to be 0.25π times the change of the potential measured midway between the ditches or tile lines. During the tail recession, the values can also be calculated from the relation of the rate of deep discharge or the potential difference with the time, according equation 3.14 (figure 21a en 21b). The determination of the storage coefficient on 9 plots during the tail recession resulted in values varying from 0.029 to 0.042 for the layer 0.00 to 0.80 m. below surface (table 26). The mean value was 0.036, which is slightly higher than the value calculated from the pF -curve.

CHAPTER IV. COMPARISON OF OBSERVATIONS TAKEN DURING SOME DISCHARGE PERIODS WITH VALUES CALCULATED BY MEANS OF EQUATIONS FOR NON-STEADY STATE GROUND-WATER FLOW

In a basin clay profile both shallow and deep discharge may occur, if the precipitation rate exceeds the infiltration rate into the low-permeable layer. On tile-drained parcels, the shallow discharge will appear as an increased discharge of the tile lines. To ascertain to what extent shallow discharge on tile-drained parcels occurs, one can calculate the rate of deep discharge and the potential difference in the high-permeable subsoil with equations 2.12 and 2.13 for non-steady state flow and can compare them with the observations.

To be able to use the equations 2.12 and 2.13, it is necessary to know the duration and the rate of the percolation flow. The rate at which the precipitation is joining the ground-water, is not identical with the infiltration rate in the surface layer or in the low-permeable layer, since storage takes place in the whole profile.

Both in the saturated and in the non-saturated zone, the soil tends to act as a buffer. The percolation rate at the ground-water level has been calculated from the deep

discharge and from the quantity of water taken up or released during a certain period in that part of the profile in which the change of the ground-water level took place. When the ground-water level rises, the deep discharge must be increased with the quantity of water stored; when on the other hand, the ground-water level falls, the deep discharge must be reduced with the released quantity of water. During the rising phase, the deep discharge cannot be measured as the discharge of the tile lines as there is a possibility of the occurrence of a shallow discharge. The deep discharge must be estimated with the aid of the ratio between the rate of deep discharge and the potential difference during the tail recession. During the period of fall, the deep discharge can be measured as the discharge of the tiles. The amount of water taken up or released, has been calculated with the aid of the mean change of the potential in the high-permeable subsoil, which has been taken to be 0.25π times the change of the potential measured midway between the tile lines, and of a storage coefficient of 0.01, determined from the pF -curve of the mean basin clay profile. The result is given in table 27, from which it appears that a reasonable agreement exists between the calculations from the data obtained on the various plots.

This method, based on the supposition that storage takes place in the whole profile gives a gradually decreasing percolation flow ending with the end of the period of discharge. It can only be applied, however, if observations on the discharge and on the ground-water level are available. Should one only have access to data on the total amount of precipitation, as was the case for the calculations given in chapter V, it will be necessary to start from a simpler supposition, in which the buffer action of the profile above the ground-water level is neglected and storage is assumed to be concentrated entirely in that part of the profile in which the change of the ground-water level takes place. In that case, a percolation rate equal to the precipitation rate can be applied and the storage coefficient of the whole profile may be used. While the first method is still allowing for a slight percolation flow during the tail recession, the second method assumes a zero percolation flow during the tail recession, compensated for in a higher value for the storage coefficient.

The observations of the rate of deep discharge and of the potential difference in the high-permeable subsoil have been compared with the values calculated on the basis of a gradually decreasing percolation rate and a storage coefficient of 0.01 and also on the basis of a percolation rate equal to the precipitation rate and a storage coefficient of 0.035 (table 28a, b, c and d). The data obtained with the first method are in good agreement with the observations, with the exception of the data of the rate of deep discharge during the first hours of the drainage period. This will have been caused by the shallow discharge. The data obtained with the second method agree to a somewhat lesser extent with the observations. The more as the supposition used in this method that the quantity of percolation water equals the amount of precipitation is justified, by a lesser moisture shortage of the soil profile, the better the agreement will be. A rate of deep discharge calculated lower than the observed value for the first hours of the drainage period, cannot entirely be explained by a discharge of the precipitation fallen on the tile line, but must also be ascribed to shallow discharge. The largest difference between the observed and calculated values of the

rate of discharge is present during the fourth drainage period, during which the highest precipitation rate occurs. On tile-drained parcels, the shallow discharge, since it only occurs during a short time, is generally of no great importance for the total discharge (table 29).

The discharge on furrowed parcels, in contrast to that on tile-drained parcels, takes largely the form of shallow discharge. Since the soil in this case acts to a lesser extent as a buffer in the drainage process, the maximum rate of discharge will be higher and the precipitation will be discharged in a shorter period of time. Very high values of the rate of shallow discharge can be calculated if the hydraulic conductivity of the top centimeters of the turf layer is amounting to several m/day and if the shallow ground-water flow is taking place in this layer (table 30).

CHAPTER V. THE DRAINAGE SYSTEM

The KD -value of the mean basin clay profile can be taken to have a value of $1 \text{ m}^2/\text{day}$, the radial resistance, when the ditches and tile lines are situated in the high-permeable layer, of 0.5 day/m , the hydraulic conductivity and the thickness of the low-permeable layer respectively of 0.05 m/day and 0.50 m . (from 0.20 to 0.70 m . below surface), and the storage coefficient of the whole profile of 0.035 . When the ground-water level comes above 0.20 m . below surface, shallow discharge is assumed to occur, largely in the top centimeters of the turf layer.

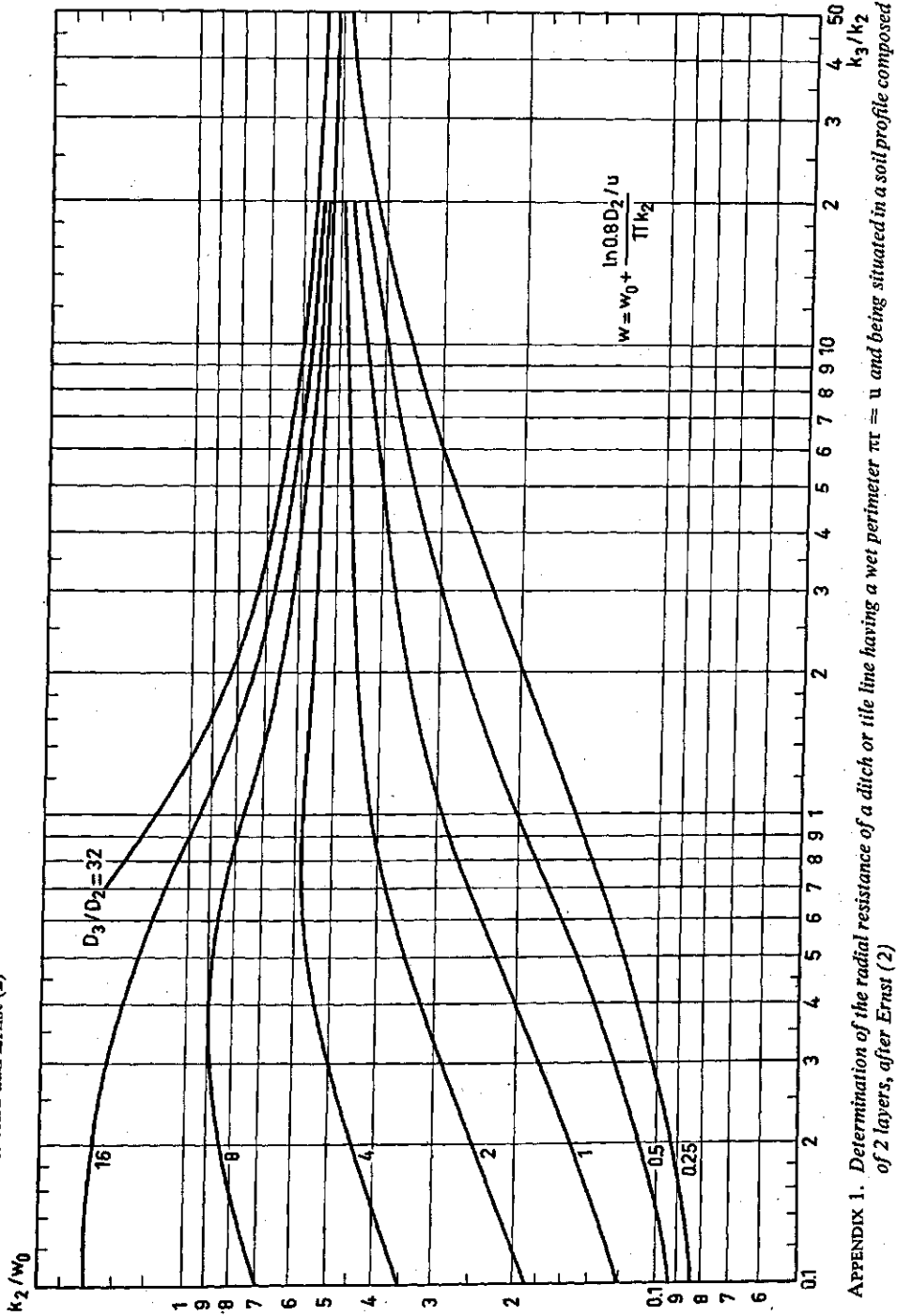
For this basin clay profile, the change in ground-water level during precipitation periods has been calculated for various drainage criteria and a water level in the ditches or tile lines at 0.90 m . below surface (table 32, in which Δh_2 has been calculated with equation 2.6, l with equation 2.7 and j with equation 2.20; and figure 24a to g). The calculation has been carried out with the equations 2.6, 2.12 and 2.13, assuming a percolation rate equal to the precipitation rate. With drainage criteria that are conforming to a rate of deep discharge of 7 mm/day or more and a potential difference of 70 cm ., i.e. a spacing of 25 m . or less, mainly deep discharge will occur and the ground-water table will drop rapidly after a precipitation period. Drainage can be achieved by a system of ditches and tile lines. In the case of sub-irrigation during summer, a supply of 1 mm/day or more is possible for each 10 cm . difference between the polder level and the ground-water level. With drainage criteria that are conforming to a rate of deep discharge of 2 mm/day or less and a potential difference of 70 cm ., i.e. a spacing of 50 m . or more, mainly shallow discharge will occur and the ground-water level will drop slowly after the precipitation period. As under these circumstances a provision has to be made for the shallow discharge, drainage must take place with a system of ditches and furrows. Drainage criteria that are conforming to a rate of deep discharge of 5 and 3 mm/day and a potential difference of 70 cm ., i.e. a spacing of 30 and 40 m . are in an intermediate position. Differences in regulation of the ground-water level will result in yield differences, which will range between 0 to 10 percent in the case of grassland (table 34) and will be in the order of 10 per cent in the case of arable land. With drainage criteria conforming to a rate of deep discharge of 7 to 9 mm/day and a potential difference of 70 cm ., the grazing possibilities for grassland

with 2 heads large stock per ha., or its equivalent, are good. With these criteria, the manner in which tillage of arable land can be carried out and its results, will be good too. An economic appraisal of this and of the difference in gain of land, and of the possibilities for mechanization, resulting in the application of either tile drainage or furrow drainage, will depend on the local conditions in farming. If tile drainage is applied in the case of an average basin clay profile, with drainage criteria conforming to a rate of deep discharge of 7 to 9 mm/day and a potential difference of 70 cm., this will result in a spacing of the tile lines, situated at a depth of 0.90 m. below surface, of 22 to 25 m.

The auger hole method is not suitable for advisory work on drain spacing in the case of a basin clay profile, since the values found are often too high in comparison with those found with the potential discharge method and since a large number of observations is necessary, due to the wide variation in data. The spacings given above may therefore be used as a standard for the execution of drainage systems in such type of profiles.

BIJLAGE 1

BIJLAGE 1. Bepaling van de radiale weerstand van een open watergang met een natte omtrek $\pi r = u$ in een bodemprofiel bestaande uit 2 lagen, ontleend aan Ernst (2)



APPENDIX 1. Determination of the radial resistance of a ditch or tile line having a wet perimeter $\pi r = u$ and being situated in a soil profile composed of 2 layers, after Ernst (2)

BILAGE 2. De coëfficiënten ter berekening van de niet-stationaire stroming, ontleend aan KRAIENHOFF VAN DE LEUR (16)

b/j	c_1	c_2	$\frac{T_0-b}{j}$	b/j	c_1	c_2	$\frac{T_0-b}{j}$	b/j	c_1	c_2	$\frac{T_0-b}{j}$
0,01	0,072	0,008		0,48	0,497	0,362		1,10	0,730	0,656	
0,02	0,102	0,016		0,50	0,507	0,375	0,416	1,15	0,743	0,673	
0,03	0,125	0,024		0,52	0,518	0,387		1,20	0,756	0,689	
0,04	0,143	0,032		0,54	0,528	0,399		1,25	0,767	0,704	
0,05	0,161	0,040	0,552	0,56	0,537	0,411		1,30	0,779	0,719	
0,06	0,176	0,049		0,58	0,546	0,422		1,35	0,790	0,732	
0,07	0,190	0,057		0,60	0,555	0,434	0,400	1,40	0,800	0,746	
0,08	0,203	0,065		0,62	0,563	0,445		1,45	0,810	0,758	
0,09	0,215	0,073		0,64	0,572	0,456		1,50	0,819	0,770	
0,10	0,227	0,081	0,530	0,66	0,580	0,467		1,55	0,828	0,781	
0,12	0,249	0,097		0,68	0,588	0,477		1,60	0,836	0,792	
0,14	0,269	0,113		0,70	0,597	0,488	0,387	1,65	0,844	0,802	
0,16	0,288	0,129		0,72	0,605	0,498		1,70	0,852	0,812	
0,18	0,305	0,145		0,74	0,612	0,508		1,75	0,859	0,820	
0,20	0,322	0,161	0,492	0,76	0,620	0,517		1,80	0,866	0,829	
0,22	0,337	0,177		0,78	0,628	0,527		1,85	0,872	0,837	
0,24	0,352	0,193		0,80	0,636	0,536		1,90	0,879	0,846	
0,26	0,367	0,208		0,82	0,643	0,545		1,95	0,885	0,853	
0,28	0,380	0,223		0,84	0,650	0,554		2,00	0,890	0,860	0,319
0,30	0,393	0,238	0,461	0,86	0,657	0,563		2,10	0,901	0,874	
0,32	0,406	0,253		0,88	0,663	0,572		2,20	0,910	0,886	
0,34	0,419	0,267		0,90	0,670	0,581		2,30	0,919	0,897	
0,36	0,430	0,281		0,92	0,677	0,589		2,40	0,927	0,906	
0,38	0,442	0,295		0,94	0,683	0,597		3,00	0,960	0,949	
0,40	0,454	0,309	0,436	0,96	0,689	0,605		4,00	0,985	0,981	
0,42	0,465	0,323		0,98	0,696	0,613		5,00	0,995	0,994	0,309
0,44	0,476	0,336		1,00	0,702	0,620	0,358				
0,46	0,487	0,349		1,05	0,715	0,638					

APPENDIX 2. The coefficients to calculate the non-steady state ground-water flow, after KRAIENHOFF VAN DE LEUR (16)

LITERATUUR

1. DUIN, R. H. A. VAN, Over de invloed van grondbewerking op het transport van warmte, lucht en water in de grond. *Verslagen van landbouwkundige onderzoeken* 62.7 (1956).
2. ERNST, L. F., Het berekenen van stationaire grondwaterstromingen, welke in een verticaal vlak afgebeeld kunnen worden. Landbouwproefstation en Bodemkundig Instituut T.N.O. Groningen, Rapport IV, 1954.
3. ———, Interne mededeling. Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, Wageningen.
4. ———, Interne mededeling. Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, Wageningen.
5. ———, en K. E. WIT, Interne mededeling. Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, Wageningen.
6. EVANS, D. D., D. KIRKHAM and R. K. FREVERT, Infiltration and permeability in soil overlying an impermeable layer. *Proc. Soil Sci. Soc. Am.* 15 (1951): 50-54.
7. FLODKVIST, H., Kulturtechnische Grundwasserforschungen. Sveriges Geologiska Undersökning, 1931.
8. FREVERT, R. K. and D. KIRKHAM, A field method for measuring the permeability of soil below a watertable. *Highway Res. Board Proc.* 28 (1948): 433-442.
9. FUKUDA, H., Underdrainage into ditches in soil overlying an impervious substratum. *Trans. Am. Geophys. Union* 38 (1957): 730-739.
10. FREQUENTIES van K-daagse neerslagsommen op Nederlandse stations-Utrecht. *Mededelingen en verhandelingen K.N.M.I.* 140-4.
11. HOORN, J. W. VAN, Results of a groundwater level experimental field with arable crops on clay soil. *Neth. J. Agric. Sci.* 6 (1958): 1-10.
12. HOOGHOUT, S. B., Bijdragen tot de kennis van enige natuurkundige grootheden van den grond no. 6. *Verslagen van landbouwkundige onderzoeken* 43 (1937).
13. ———, Bijdragen tot de kennis van enige natuurkundige grootheden van den grond no. 7. *Verslagen van landbouwkundige onderzoeken* 46 (1940).
14. ———, Rapport over de verrichte onderzoeken op de proefboerderij te Kessel (NB). Landbouwproefstation en Bodemkundig Instituut T.N.O. Groningen, 1950.
15. KRAIJENHOFF VAN DE LEUR, D. A., A study of non-steady groundwater flow with special reference to a reservoir-coefficient. *De Ingenieur* 70 (1958): 87-94.
16. ———, Interne mededeling.
17. LEVERT, C., Regens, een statistische studie. *Mededelingen en verhandelingen K.N.M.I.* 102-62.
18. MINDERHOUD, J. W., Grasgroei en grondwaterstand. Onderzoeken over de betekenis van de grondwaterstand voor komkleigrasland. Proefschrift Wageningen. Proefstat. Akker- en Weidebouw, 1960.
19. ———, Jaarverslag 1956. Commissie Onderzoek Komgronden, Tiel.
20. ———, Interne mededeling.
21. MUDRA, A., Statistische methoden für landwirtschaftliche Versuche. Parey, Berlin 1958.
22. PEERLKAMP, P. K., Bodemmeteorologische onderzoeken te Wageningen. *Mededelingen Landbouwhogeschool* 47 (1944): 1-96.
23. REEVE, R. C. and D. KIRKHAM, Soil anisotropy and some field methods for measuring permeability. *Trans. Am. Geophys. Union* 32 (1951): 585-590.
24. SOMEREN, C. VAN, Verslag van een onderzoek naar het effect ten gevolge van slootwand perforatie op het bedrijf van de heer Soede te Nieuwersluis. Rapport Afd. Onderzoek van de Cultuurtechnische Dienst, Utrecht, 1959.
25. SONNEVELD, F., Het slootkanteffect in het klei-op-veengebied in Zuid-Holland. *Boor en Spade* VII (1954): 181-188.
26. ———, Bodemkartering en daarop afgestemde landbouwkundige onderzoeken in het Land van Heusden en Altena. *Verslagen van landbouwkundige onderzoeken* 64.4 (1958).
27. THYSSEN, H. A. C., C. T. DE WIT, E. VAN VOLLINGHOVEN, H. J. TIMMERS en L. ADMIRAAL, New instruments for agricultural research. *Neth. J. Agric. Sci.* 2. (1954): 209-214.

28. VISSER, W. C., De vochthuishouding van de komkleigebieden. Lezing 1949.
29. ———, Interne Mededeling. Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, Wageningen.
30. WESSELING, J., Enige aspecten van de waterbeheersing in landbouwgronden. *Verslagen van landbouwkundige onderzoeken* 63.5 (1957).
31. WISLER, C. O. and E. F. BRATER, Hydrology. Wiley, New York 1949.
32. YOUNGS, E. G., Redistribution of moisture on porous materials after infiltration. *Soil Sci.* 86 (1958): 117-125, 202-207.
33. ZEEUW, J. W. DE en F. HELLINGA, Neerslag en afvoer. *Landbouwkundig Tijdschrift* 70 (1958): 405-421.

LIJST VAN GEBRUIKTE SYMBOLEN

Symbool	Omschrijving	Dimensie
a	afvoersnelheid	lt^{-1}
a_1	ondiepe afvoersnelheid (in de zodelaag of bouwvoor)	lt^{-1}
a_2	afvoersnelheid in de slecht doorlatende laag	lt^{-1}
a'_2	indringingssnelheid in de onverzadigde zone van de slecht doorlatende laag	lt^{-1}
a_3	diepe afvoersnelheid (in de goed doorlatende ondergrond)	lt^{-1}
$(a_3)_0$	diepe afvoersnelheid op het tijdstip 0	lt^{-1}
$(a_3)_t$	diepe afvoersnelheid op het tijdstip t	lt^{-1}
b	tijdsinterval met een constante zaksnelheid	t
c_1	coëfficiënt in vergelijking 2.12, te ontleen aan (16)	—
c_2	coëfficiënt in vergelijking 2.13, te ontleen aan (16)	—
d	dikte van de equivalentlaag volgens HOOGHOUDT	l
D	dikte van een laag beneden de grondwaterstand	l
D_1	dikte van de zodelaag of bouwvoor beneden de grondwaterstand	l
D_2	dikte van de slecht doorlatende laag beneden de grondwaterstand	l
	-- in vergelijking 2.10 de dikte van de slecht doorlatende laag beneden het peil van de open watergang	l
D_3	dikte van de goed doorlatende ondergrond beneden de grondwaterstand	l
D'_3	dikte van de goed doorlatende ondergrond beneden het peil van de open watergang	l
h	waterhoogte boven het indringingsvlak	l
Δh	totaal potentiaalverschil tussen de grondwaterstand midden tussen de open watergangen en het peil van de open watergang	l
Δh_1	potentiaalverschil in de zodelaag of bouwvoor	l
Δh_2	potentiaalverschil in de slecht doorlatende laag	l
Δh_3	potentiaalverschil in de goed doorlatende ondergrond	l
$(\Delta h_3)_0$	potentiaalverschil in de goed doorlatende ondergrond op het tijdstip 0	l
$(\Delta h_3)_t$	potentiaalverschil in de goed doorlatende ondergrond op het tijdstip t	l
Δh_{vert}	verticaal potentiaalverschil	l
Δh_{hor}	horizontaal potentiaalverschil	l
Δh_{rad}	radiaal potentiaalverschil	l
j	reservoircoëfficiënt	t
K	doorlaatfactor van verzadigde grond	lt^{-1}
K_1	doorlaatfactor van de zodelaag of bouwvoor	lt^{-1}
K_2	doorlaatfactor van de slecht doorlatende laag	lt^{-1}
K_3	doorlaatfactor van de goed doorlatende ondergrond	lt^{-1}
K_T	doorlaatfactor van de transmissiezone	lt^{-1}
l	afstand tussen de open watergangen (sloot, drain, greppel)	l

Symbool	Omschrijving	Dimensie
$(N-V)_t$	neerslagoverschot in een tijdsinterval t	l
p	zaksnelheid naar de verzadigde zone	lt^{-1}
T	tijd	t
T_0	tijdsinterval tussen het begin van de zakwaterstroming en het begin van het staartverloop	t
u	natte omtrek van de open watergang	l
w	radiale weerstand	$l^{-1}t$
z	afstand van het bevochtigingsfront tot het indringingsvlak	l
α	intensiteitsfactor	t^{-1}
ψ	onderdruk aan het bevochtigingsfront	l
μ	bergingscoëfficiënt	$-$

LIST OF USED SYMBOLS

Symbol	Definition	Dimension
a	rate of discharge	lt^{-1}
a_1	rate of shallow discharge (in the turf- or tilled layer)	lt^{-1}
a_2	rate of discharge in the low-permeable layer	lt^{-1}
a'_2	infiltration rate in the non-saturated zone of the low-permeable layer	lt^{-1}
a_3	rate of deep discharge (in the high-permeable subsoil)	lt^{-1}
$(a_3)_0$	rate of deep discharge at time 0	lt^{-1}
$(a_3)_t$	rate of deep discharge at time t	lt^{-1}
b	time interval with a constant percolation rate	t
c_1	coefficient in equation 2.12, to take from (16)	~
c_2	coefficient in equation 2.13, to take from (16)	~
d	thickness of equivalent layer after HOOGHOUDT	l
D	thickness of a layer under the ground-water table	l
D_1	thickness of the turf- or tilled layer under the ground-water table	l
D_2	thickness of the low-permeable layer under the ground-water table	l
	in equation 2.10, thickness of the low-permeable layer under the water table of the ditch or tile line	l
D_3	thickness of the high-permeable subsoil under the ground-water table	l
D'_3	thickness of the high-permeable subsoil below the water table of the ditch or tile line	l
h	height of water above the infiltration level	l
Δh	total potential difference between the ground-water table midway between the ditches or tile lines and the water table of the ditch or tile line	l
Δh_1	potential difference in the turf- or tilled layer	l
Δh_2	potential difference in the low-permeable layer	l
Δh_3	potential difference in the high-permeable subsoil	l
$(\Delta h_3)_0$	potential difference in the high-permeable subsoil at time 0	l
$(\Delta h_3)_t$	potential difference in the high-permeable subsoil at time t	l
Δh_{vert}	vertical potential difference	l
Δh_{hor}	horizontal potential difference	l
Δh_{rad}	radial potential difference	l
j	reservoir coefficient	t
K	hydraulic conductivity in saturated soil	lt^{-1}
K_1	hydraulic conductivity of the turf- or tilled layer	lt^{-1}
K_2	hydraulic conductivity of the low-permeable layer	lt^{-1}
K_3	hydraulic conductivity of the high-permeable subsoil	lt^{-1}
K_T	hydraulic conductivity in the transmission zone	lt^{-1}
l	spacing between ditches, tile lines or furrows	l

Symbol	Definition	Dimension
$(N-V)_t$	precipitation-surplus in time interval t	l
p	rate of percolation to the saturated zone	lt^{-1}
T	time	t
T_0	time interval between the start of the percolation and the start of the tail recession	t
u	wet perimeter of the ditch, tile line or furrow	l
w	radial resistance	$l^{-1}t$
z	height of the infiltration column	l
α	intensity factor	t^{-1}
ψ	capillary potential at the wetting front	l
μ	storage coefficient	-

1 m = 1 meter = 39.371 inch

1 cm = 1 centimeter = 0.393 inch

1 kg = 1 kilogram = 2.204 lbs

1 are = 0.02471 acre = 119.60 sq.yrd